



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**Fakultät Maschinenwesen**

---

Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik  
Professur für Fügetechnik und Montage  
Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

## **Analyse von Schweißnahtunregelmäßig- keiten beim WIG-Orbitalschweißen von vollaustenitischen Stahlrohren**

Von                      Hauser, Gerd

Geboren am    30.11.1984                      in Dresden, Deutschland

zur

Erlangung des akademischen Grades  
Diplomingenieur  
(Dipl.-Ing.)

vorgelegte Diplomarbeit.

Tag der Einreichung: 04.05.2011

1. Gutachter: .....

2. Gutachter: .....

Angenommen / nicht angenommen

Dresden, den.....

**Aufgabenstellung für die Diplomarbeit**

Bearbeiter: Gerd Hauser  
Im Studiengang: Maschinenbau  
In der Studienrichtung: Produktionstechnik

**Thema: Analyse der Schweißnahtunregelmäßigkeiten beim WIG-Orbitalschweißen von vollaustenitischen Stahlrohren**

Analysis of irregularities in TIG orbital welded fully austenitic steel pipes

Das teilautomatisierte gepulste WIG-Orbitalschweißen ist das Standardverfahren für das Schweißen dünnwandiger Rohre, wie z. B. Leitungen aus vollaustenitischem Chrom-Nickel-Stahl für hochreine Medien. Von besonderer Bedeutung ist eine anlauffarbenfreie Schweißnahtwurzel. Trotz ausgereifter Technik treten unter Baustellenbedingungen sporadisch immer wieder unzulässige Anlauffarben auf.

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der Unregelmäßigkeiten und die Festlegung von Randparametern, durch die ein anlauffarbenfreies Schweißbild auch unter extremen Bedingungen sicher möglich ist. Weiterhin soll die Anwendbarkeit von Dreistoffmischgasen wie Argon/Helium/Wasserstoff im Vergleich zu Argon/Helium und Argon hoher Reinheit (5.0) untersucht werden.

Es sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:


- Systematische Analyse der Ursachen für die Bildung von Anlauffarben,
- Zusammenstellung bereits angewandter Maßnahmen zur Reduzierung von Anlauffarben beim Schweißen unter Baustellenbedingungen,
- Erarbeitung weiterer Maßnahmen zur Vermeidung der Nahtfehler und Nachweis der Wirksamkeit dieser Maßnahmen
- Schweißversuche mit unterschiedlichen Gasgemischen bei variierenden Parametersätzen
- Technische und wirtschaftliche Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in einem Bericht zusammenzufassen.


Betreuer:	Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. U. Krüger	(Intega GmbH)
	Dipl. Ing. (FH) G. Stehli	(Intega GmbH)
	Dipl.-Ing. J. Zähr	(TU Dresden)
	Dr.-Ing. J. Zschetzsche	(TU Dresden)

Ausgehändigt am: 05.01.2011  
Einzureichen am: 04.05.2011

Die von der Studienrichtung erlassenen Richtlinien zur Ausfertigung der Diplomarbeit sind zu beachten.



Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel  
Studiendirektor



Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel  
Betreuender Hochschullehrer

## Kurzreferat

Die Bildung von Anlauffarben durch molekularen Sauerstoff im Wurzelschutzgas ist bereits gut erforscht. Weitere Sauerstoffquellen für die Bildung von Anlauffarben sind Feuchte und CO<sub>2</sub>. Besonders Feuchte ist in diesem Zusammenhang kritisch, da sie sich wesentlich langsamer mit den etablierten Mitteln entfernen lässt.

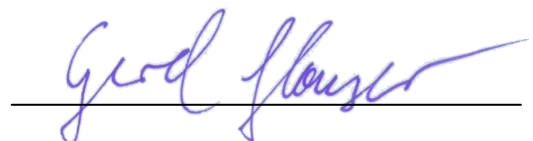
Im Rahmen dieser Arbeit konnte für durch Feuchte verursachte Anlauffarben im Wurzelschutzgas ein Grenzwert von 300 ppm bei 23 °C ermittelt werden. Die Farbausprägung der durch Feuchte verursachten Anlauffarben tendiert besonders bei schwachen bis mittleren Ausprägungen (450-800 ppm) stärker ins Bräunliche als die durch molekularen Sauerstoff verursachten Anlauffarben.

Mit Hilfe des an der TU Dresden entwickelten Algorithmus für die Auswahl von Gas Komponenten für Prozessgase, wurde für das gepulste WIG-Orbitalschweißverfahren von austenitischen CrNi-Stahlrohren das Gasmisch Ar/He/H<sub>2</sub> 20/70/10 ausgewählt. Gegenüber dem ursprünglich als Prozessgas verwendeten Argon und einem Ar/He 70/30 Gemisch, zeigte sich eine mögliche Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit um den Faktor 3,5.

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, Gerd Hauser, dass ich die von mir eingereichte Diplomarbeit zu dem Thema: „Analyse von Schweißnahtunregelmäßigkeiten beim WIG-Orbitalschweißen von vollaustenitischen Stahlrohren“ unter der Betreuung von Frau Dr.-Ing. J. Zähr, Herr Dr.-Ing. J. Zschetzsche, Herr Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel, Herr Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. U. Krüger, Herr Dipl.-Ing. (FH) G. Stehli eigenständig und nur unter Zuhilfenahme der in der Arbeit angegebenen Literatur und Abstimmungspartner angefertigt habe.

Dresden den 03. Mai 2011





## Thesen

- Die durch Feuchte verursachten Anlauffarben sind in ihrem Erscheinungsbild mit denen von molekularem Sauerstoff vergleichbar.
- Eine zunder- und anlauffarbenfreie nahtwurzelseitig Werkstückoberfläche kann nur durch die Verwendung von Wurzelschutzgas erreicht werden, um Sauerstoff, Kohlendioxid und Feuchte im Bereich der WEZ zu verdrängen.
- Das anlauffarbenfreie WIG-Schweißen von austenitischen Stählen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt ist bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen, z. B. trockenes Wurzelschutzgas mit einer Reinheit  $>4.6$  und einer trockenen Werkstückoberfläche, möglich.
- Eine durch Kondensation infolge von Temperaturschwankungen verstärkte Feuchteansammlung und eine niedrigere Prozess- sowie Wurzelschutzgastemperatur ist die Hauptursache für Unregelmäßigkeiten wie Anlauffarben bei winterlichen Baustellenbedingungen unter Einhaltung der üblichen Schutzmaßnahmen.
- Die Vorschubgeschwindigkeit und damit die Prozessgeschwindigkeit kann durch die Verwendung des Dreistoffgasgemisches Argon/Helium/Wasserstoff gegenüber reinem Argon/Helium oder reinem Argon merklich gesteigert werden.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik.....	2
2.1	WIG-Schweißen .....	2
2.1.1	Gepulstes WIG-Schweißen .....	2
2.1.2	WIG-Orbitalschweißen .....	5
2.2	Schweißen von austenitischem CrNi-Stahl .....	7
2.2.1	Schweißtechnische Verarbeitung von austenitischem CrNi-Stahl .....	7
2.2.2	Schweißnahtunregelmäßigkeit: Anlauffarben .....	12
2.3	Prozess- und Wurzelschutzgase .....	17
2.3.1	Prozessgase.....	18
2.3.2	Wurzelschutzgase .....	21
2.4	Messung von Sauerstoff und Feuchte bei schweißtechnischen Anwendungen .....	23
3	Präzisierung der Aufgabenstellung .....	28
4	Analyse von Baustellenbedingungen und Maßnahmen auf Winterbaustellen ....	29
4.1	Beschreibung der Bedingungen .....	29
4.2	Beschreibung der Unregelmäßigkeiten .....	31
4.3	Bewertung der etablierten Maßnahmen .....	33
5	Versuchsplanung und Durchführung .....	35
5.1	Experimentelle Randbedingungen .....	35
5.1.1	Geräte, Messmittel und Software .....	35
5.1.2	Versuchswerkstoffe und Materialien.....	42
5.1.3	Schweißparameter .....	43
5.1.4	Auswertungsmethoden.....	44
5.2	Einfluss der Feuchte in Wurzelschutzgasen.....	47
5.2.1	Schweißversuche bei konstanten und wechselnden Temperaturen.....	47
5.2.2	Versuche zur Feuchteansammlung im Rohr .....	49
5.2.3	Versuch zur Bildung von Anlauffarben bei unterschiedlichen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas .....	51
5.3	Einfluss der Prozessgaszusammensetzung für die Gasgemische Ar, Ar/He, Ar/He/H <sub>2</sub> .....	53
6	Auswertung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen .....	56
6.1	Anlauffarben auf Winterbaustellen .....	56
6.1.1	Einfluss der Außentemperatur auf den Schweißprozess.....	56
6.1.2	Einfluss von Feuchteansammlungen in Rohren .....	61

6.1.3	Einfluss von unterschiedlichen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas .....	63
6.1.4	Schlussfolgerungen für die Anwendung in der Praxis .....	68
6.2	Einfluss der Prozessgaszusammensetzung beim WIG-Orbitalschweißen ...	74
6.2.1	Versuchsauswertung .....	74
6.2.2	Anwendung des Mischgases Ar/He/H <sub>2</sub> in der Praxis .....	80
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	81
8	Quellenverzeichnis .....	82
9	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	87
10	Anlagenverzeichnis.....	92

## Verzeichnisse verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
E	Streckenenergie	kJ/cm
m	Masse	kg
m <sup>s</sup>	Masse an adsorbierten Material	kg
m <sub>∞</sub>	Grenzwert an Masse, die unter den Bedingungen T= konstant und p→∞ adsorbiert werden kann	kg
p	Druck	MPa
p <sub>s</sub>	Sättigungsdruck	MPa
p <sub>d</sub>	Partialdruck	MPa
R	Gaskonstante eines einzelnen Gases	kJ/ (kg*K)
R <sub>a</sub>	Farbwiedergabeindex	K
t	Zeit	s
T	absolute Temperatur	K
v	Geschwindigkeit	m/s
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> /K
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
θ	Temperatur	°C
ρ	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
φ	Relative Luftfeuchtigkeit	-

**Indizes**

P

H

G

**Bezeichnung**

Puls

Hoch

Grund

**Abkürzungen**

EDX

FN

GI

PFA

WEZ

ZTU

**Bezeichnung**

Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Ferritnummern

Gleichung

Perfluoralkoxylalkan, ein vollständig fluorierter Kunststoff

Wärmeeinflusszone

zeit - und temperaturabhängiges Umwandlungsverhalten

# 1 Einleitung

Das Fügen von korrosionsbeständigen austenitischen Chrom-Nickel-Stahlrohren im Dünnwandbereich von 0,5 bis 3 mm ist besonders in den Industriebereichen Halbleiterherstellung, Pharmazie, Chemie, Lebensmittelherstellung und der Fotovoltaik von Bedeutung. In der Praxis wird dafür vorrangig das gepulste WIG-Orbitalschweißen eingesetzt. Dieser Fügeprozess ist aufgrund der jahrelangen Erfahrungen gut beherrschbar. Lediglich das Schweißen der Rohre im Freien unter Winterbedingungen stellt aktuell eine besondere Herausforderung dar.

Das austenitische Rohrmaterial kann ohne Einschränkungen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt verarbeitet werden. Jedoch kommt es bei dem gepulsten WIG-Orbitalschweißen sporadisch zu Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Bei den auftretenden Unregelmäßigkeiten handelt es sich vor allem um Schweißnahtmittenabweichungen und Anlauffarben, wobei besonders die Anlauffarben durch ihre korrosionsbegünstigende Wirkung problematisch sind. Die dem Stand der Technik entsprechenden und unter normalen Bedingungen sehr wirksamen Maßnahmen zur Vermeidung von Anlauffarben, z. B. die Verwendung von hochreinem Wurzelschutzgas und Vorwärmen, scheinen unter den winterlichen Bedingungen weniger zuverlässig zu sein. Die Folge sind kostenintensive Nacharbeiten, die vom Beizen des Rohrabchnittes bis hin zum Austausch der Schweißnaht im Rohr mit einem neuen Rohrabschnitt reichen.

Um diese Kosten zu reduzieren, sind auf den Baustellen im Winter zusätzliche Maßnahmen notwendig, die eine Reduzierung der Häufigkeit der Unregelmäßigkeiten bewirken. Eine absolute Sicherheit für anlauffarbenfreies Schweißen gewährleisten aber auch sie nicht. Ziel dieser Arbeit ist es, die Ursachen der sporadisch auftretenden Unregelmäßigkeiten zu untersuchen und anhand der Ergebnisse neue Maßnahmen zu erarbeiten.

Eine weitere Optimierungsaufgabe stellt in der Praxis die Erhöhung der Produktivität dar. Ein Ansatz dafür bildet die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit. Im Rahmen der Arbeit soll deswegen ein bisher am Markt noch nicht verfügbares Gasgemisch auf seine Eignung für das gepulste WIG-Orbitalschweißen von dünnwandigen Rohren getestet werden. Ausgehend von Arbeiten an der TU Dresden wird aufgrund dessen das Dreistoffgemisch Ar/He/H<sub>2</sub> 20/70/10 im Vergleich zum Standardprozessgas Argon untersucht.

Die Ziele sind die Bewertung der Anwendbarkeit des Gemisches im Dünnblechbereich (0,5-3 mm), das Feststellen der tatsächlich erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit und eine Prüfung der Eignung hinsichtlich der Anlauffarbenproblematik auf Winterbaustellen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 WIG-Schweißen

Das Wolfram-Inert-Gas-Schweißen nutzt zur Energieübertragung zwischen einer nicht abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück einen Lichtbogen. Der Lichtbogen wird dabei in einer Atmosphäre aus inertem Gas oder einem Mischgas aus inerten und reaktionsträgen Gasen gezündet. Die verwendeten Gase verhindern dabei gleichzeitig eine Reaktion der Wolframelektrode und des Schmelzbades mit der sie umgebenden Atmosphäre. [1][2]

Die Verwendung von Zusatzwerkstoff ist bei diesem Verfahren optional. Abhängig von der jeweiligen Anwendung wird mit Gleich- oder Wechselstrom geschweißt. Bei Gleichstrom ist die Elektrode des WIG-Brenners bis auf wenige Spezialfälle negativ gepolt, um die thermische Belastung so gering wie möglich zu halten und damit die Lebensdauer der Wolframelektrode gegenüber einer Schweißung mit plusgepolter Elektrode deutlich zu verlängern. [1]

Bei neueren Stromquellen wird der Lichtbogen mit Hilfe einer Hochfrequenzzündung initiiert. Nach Stabilisierung des Startlichtbogens wird die Stromstärke auf die Schweißstromstärke erhöht.

- **Vorteile:**

- Verfahren universell anwendbar
- einfache Handhabung
- Zusatzwerkstoffzufuhr gut steuerbar
- hohe Schweißnahtgüten
- Zwangspositionen geeignet

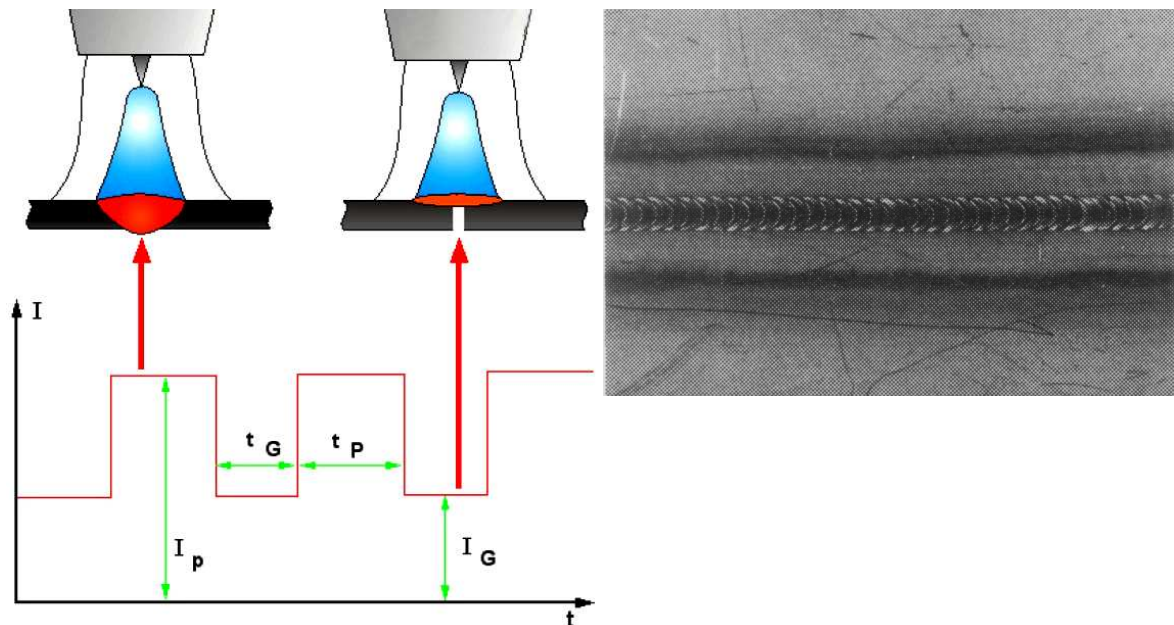
- **Nachteile:**

- im Dickblechbereich nur bedingt einsetzbar
- hohe Abschmelzleistungen nur bei erhöhtem technischen Aufwand möglich

#### 2.1.1 Gepulstes WIG-Schweißen

Das gepulste WIG-Schweißen wird durch die Modulation des Stroms während der gesamten Prozessdauer charakterisiert. **Abbildung 1** zeigt die schematische Änderung des Stromes über die Zeit.  $I_G$  steht dabei für den Grundstrom und  $I_P$  für den Puls- oder Hochstrom [3]. Die Elektrode wird bei dieser Verfahrensvariante in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff, vorwiegend als Kathode gepolt.

Der Wechsel zwischen Grund- und Hochstromphase hat einen deutlichen Einfluss auf das Schweißbad. In der Hochstromphase wird durch den starken Energieeintrag das Grundmaterial aufgeschmolzen. In der Grundstromphase erfolgt durch die geringere Energiezufuhr eine teilweise Abkühlung und damit die Erstarrung des Schmelzbades.



**Abbildung 1:** Links: Schematische Darstellung des Stromverlaufs beim gepulsten WIG-Schweißen [3]  
 $I_G$  - Grundstrom;  $I_P$  - Pulsstrom/Hochstrom;  $t_G$  - Pulsdauer der Grundstromphase;  $t_P$  - Pulsdauer der Hochstromphase; rechts: Erscheinungsbild einer gepulsten WIG-Schweißnaht [1]

Zu den Vorteilen der Hochstromphase zählen unter anderem ein großes Schmelzbad, gute Flankenaufschmelzung und ein höherer Staudruck des Lichtbogens [2], der einen tiefen Einbrand in das Material ermöglicht. [1]

Die Vorteile der Grundstromphase liegen in der geringeren Energieeinbringung und dem kleinen Schmelzbad, sodass eine bessere Kontrolle in Zwangslagen möglich ist. Durch den Wechsel zwischen diesen beiden Phasen können die Vorteile der jeweiligen Lichtbogeneigenschaften in einem Prozess genutzt werden.

Um diesen Effekt optimal nutzen zu können, muss die Pulsrate an den Brennvorschub angepasst sein, sodass sich die Bereiche der Hochstromphasen zu etwa 60 % überlappen. Das typische Erscheinungsbild einer gepulsten WIG-Schweißnaht ist in

**Abbildung 1** rechts dargestellt. [1]

Die Pulstechnik hat sich besonders für das Durchschweißen von Schweißverbindungen als vorteilhaft erwiesen, bei denen ein starker Gradient der Wärmeableitung der Fügepartner zueinander vorliegt. Dies kann z. B. durch Verwendung unterschiedlicher Materialstärken und/oder Stahllegierungen bei den Fügepartnern auftreten. In **Abbildung 2** ist beispielhaft eine Austenit-Ferritverbindung mit unterschiedlichen Materialstärken dargestellt. [1]



Weitere Vorteile des gepulsten WIG-Schweißens liegen in der geringeren Wärme-einbringung im Vergleich zum ungepulsten WIG-Schweißen und dem damit einher-gehenden geringeren Verzug, der verringerten Heißrissanfälligkeit sowie der besse-ren Spaltüberbrückbarkeit. [1][4][5]

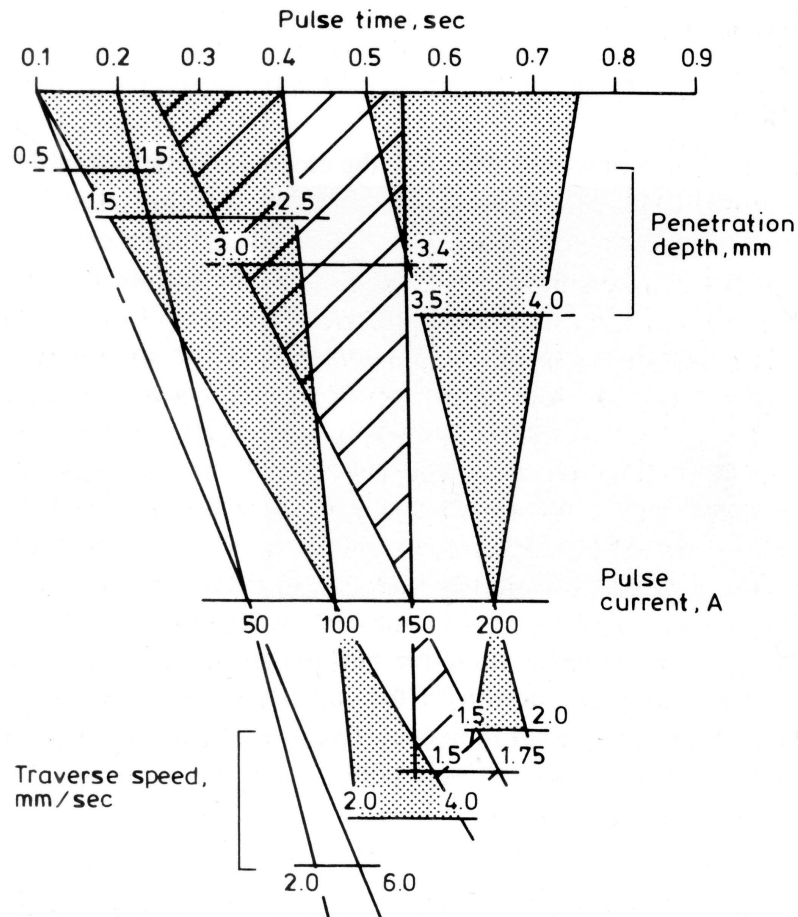


**Abbildung 2:** gepulste WIG-Schweißung zwischen 0,1 mm dickem, hochlegiertem Stahl und 1 mm dickem Baustahl [1]

Die Hochstromstärke ist bei diesem Verfahren hauptsächlich von der Wärmeleitfä-higkeit des Materials abhängig und die Pulsdauer von der Materialdicke. [1]

So ist für das Schweißen von 2,5 mm dickem, hochlegiertem Stahl bei 100 A eine Pulsdauer von 0,4 s erforderlich. Für eine Materialstärke von 1,5 mm reduziert sich die Pulszeit auf 0,1 s. In **Abbildung 3** sind die genannten Zusammenhänge grafisch dargestellt. Diese Übersicht und die genannten Richtwerte verstehen sich allerdings nur als ein grober Leitfaden bei der Auswahl der Parameter. Eine Anpassung auf den einzelnen Anwendungsfall muss anhand von Schweißversuchen stattfinden. [1]

Neben den genannten Vorteilen der Pulstechnik bringt die Erhöhung der Prozessparameteranzahl aber auch Probleme mit sich, sowohl bei der Parameterauswahl als auch der Steuerung während des Prozesses. Besonders die Parameter Grundstrom, Hochstrom, Pulszeiten sowie das Verhältnis der Grund- zur Hochstromphase und die Vorschubgeschwindigkeit müssen für jeden Werkstoff und dessen Materialdicke und Nahtform spezifisch bestimmt werden. Zudem ist die Anlagentechnik deutlich teurer. [1][4][5]



**Abbildung 3:** Zusammenhang zwischen Pulsdauer, Hochstromstärke und Vorschubgeschwindigkeit beim gepulsten WIG-Schweißen [1]

### 2.1.2 WIG-Orbitalschweißen

WIG-Orbitalschweißen bezeichnet einen WIG-Prozess, bei dem ein WIG-Brenner mit einer Antriebseinheit ein feststehendes Rohr umfährt. Der WIG-Brenner bewegt sich dabei entlang einer Führung. Wodurch die Elektrode einen gleichbleibenden Abstand zum Werkstück hat. **Abbildung 4** zeigt eine stationäre Vorrichtung zum Positionieren, Heften und Schweißen von Rohren. Spezielle Funktionen wie Kalt- und Heißdrahtzufuhr sind ebenfalls realisierbar.

Besondere Anforderungen, wie das Schweißen von bereits vormontierten Teilen in Verbindung mit engen räumlichen Verhältnissen, machen besondere Brennerformen nötig. Für diesen Anwendungsbereich gibt es die Ausführung des Schweißkopfes (Antriebseinheit mit Elektrode und Schutzgasabdeckung) als Schweißzange. In **Abbildung 5** sind Schweißzangen für unterschiedliche Rohrdurchmesserbereiche dargestellt. Diese sehr kompakten Varianten sind besonders für das Schweißen von kleinen bis mittleren Rohrdurchmessern (1/8-7") mit Wandstärken im Bereich von 0,5 mm bis 3 mm geeignet. [5]

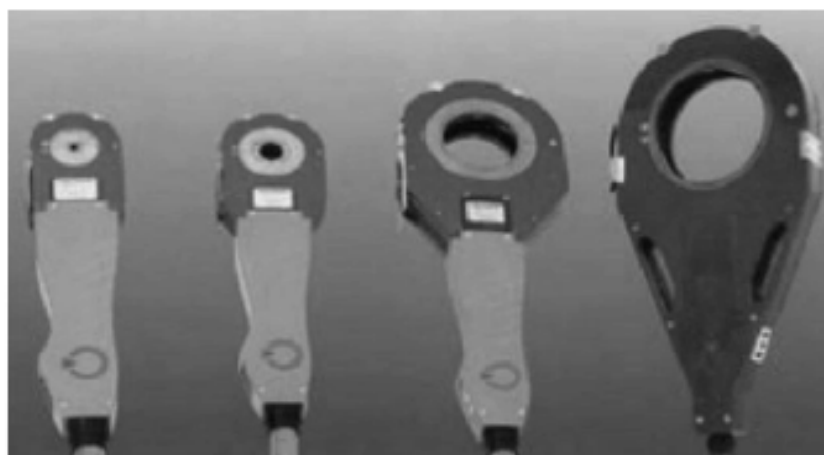
Durch die kompakte Bauweise ist das Zuführen von Zusatzwerkstoff nicht möglich, weshalb die Ausführung der Schweißverbindung als Stumpfstoß mit einer I-Naht erfolgt.

Eine interessante Variante ist das Engspalt-Schweißen. Dabei wird ein „Schweißschwert“ mit Elektrodenpendelfunktion verwendet. Der Vorteil besteht in der deutlich schmalen V-Naht, welche einen erheblichen Teil an Zusatzwerkstoff einspart und verkürzt dadurch auch gleichzeitig die Schweißdauer verkürzt. [5]

Bei allen Varianten können die Verfahrensparameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Pulsrate oder Balance (abhängig von der eingesetzten Stromart) sowie Stromstärke für jeden Abschnitt des umfahrenen Rohres angepasst werden. Randbedingungen, die sich während des Prozesses ändern, z. B. die Schwerkraftrichtung und der Wärmeverlauf, können so erfolgreich ausgeglichen werden. [6]



**Abbildung 4:** Orbitalschweißanlage mit eingespanntem Rohr [5]



**Abbildung 5:** Schweißzangen für unterschiedliche Rohrdurchmesser [5]

## 2.2 Schweißen von austenitischem CrNi-Stahl

### 2.2.1 Schweißtechnische Verarbeitung von austenitischem CrNi-Stahl

Austenitische CrNi-Stähle besitzen eine gute bis sehr gute Schweißseignung, vor allem bei der Verwendung von artgleichem Grund- und Zusatzwerkstoff. [9] [10]  
Folgende Eigenschaften unterscheiden dabei einen austenitischen CrNi-Stahl von einem unlegierten Stahl [10] :

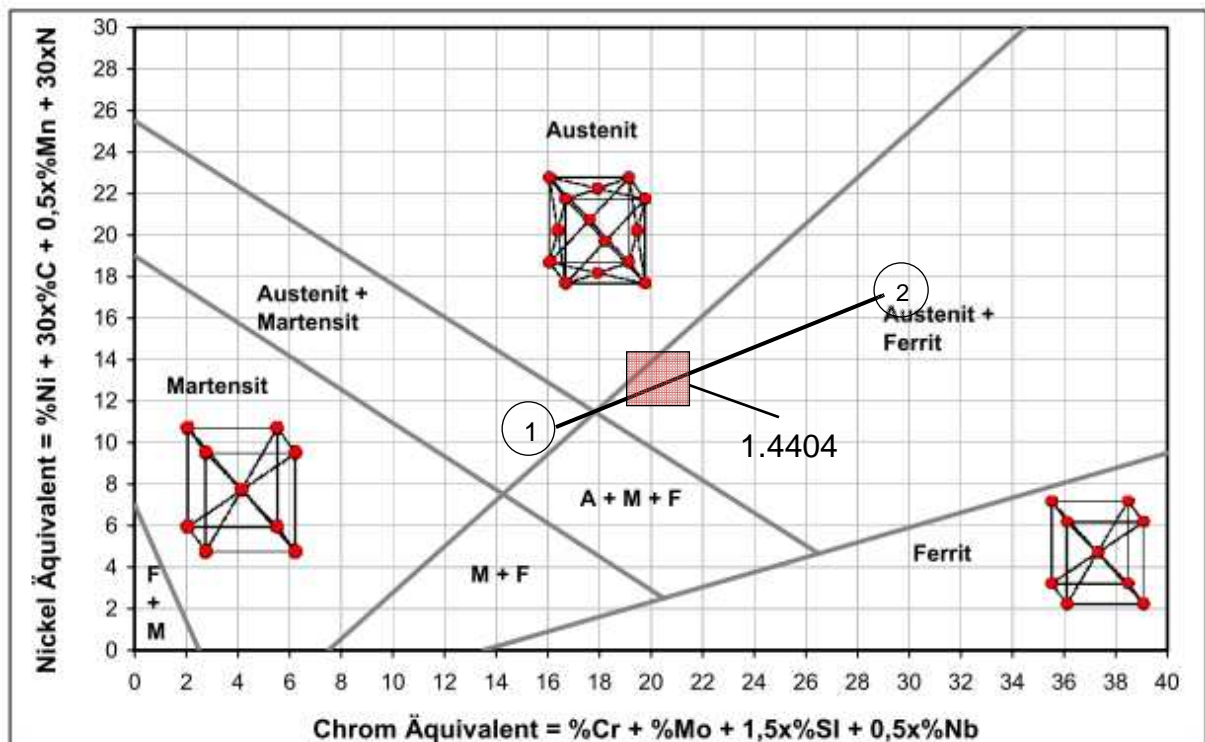
- unmagnetisch
- deutlich größerer Wärmeausdehnungskoeffizient (um etwa 50 %) → Gefahr des Verzugs
- Verringerung der Wärmeleitfähigkeit (etwa um den Faktor 3)
- großes Verformungsvermögen (35 bis 40 % Dehnung)
- Korrosionsbeständigkeit durch selbstheilende Chromoxidschicht (ab 10,5 % Cr)
- deutlich höhere Kaltzähigkeit (Nickelgehalt über 8 %)
- sehr starke Kaltverfestigung möglich
- höhere Löslichkeit für Legierungselemente

Des Weiteren ist vor allem für das Schweißen von Austenit-Ferrit-Verbindungen die Verwendung von artfremden Zusatzwerkstoffen üblich. Damit wird verhindert, dass die größtenteils wünschenswerten Eigenschaften des austenitischen Grundwerkstoffes im Bereich der Fügezone beeinträchtigt werden. Der Grund dafür liegt in der Reduzierung der für die Austenitbildung (z. B. Ni) und Korrosionsbeständigkeit (z. B. Cr) verantwortlichen Legierungselemente im Schweißgut durch die Zumischung von unlegiertem oder niedriglegiertem Stahl. Die für die Ausbildung eines austenitischen Gefüges benötigten Legierungselemente werden durch das Zusatzmaterial ergänzt. Das sich ausbildende Gefüge kann mit Hilfe von empirischen Formeln berechnet werden. Gleichung (1) gibt das Chrom-Äquivalent an. Berücksichtigt werden die wichtigsten ferritbildenden Legierungsbestandteile. Mit Hilfe der Gleichung (2) kann das Nickeläquivalent, d. h. die Wirksumme der austenitbildenden Legierungsbestandteile, berechnet werden. [10]

$$Cr_{\text{äq}} = Cr + Mo \cdot 1,5 + Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (1)$$

$$Ni_{\text{äq}} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (2)$$

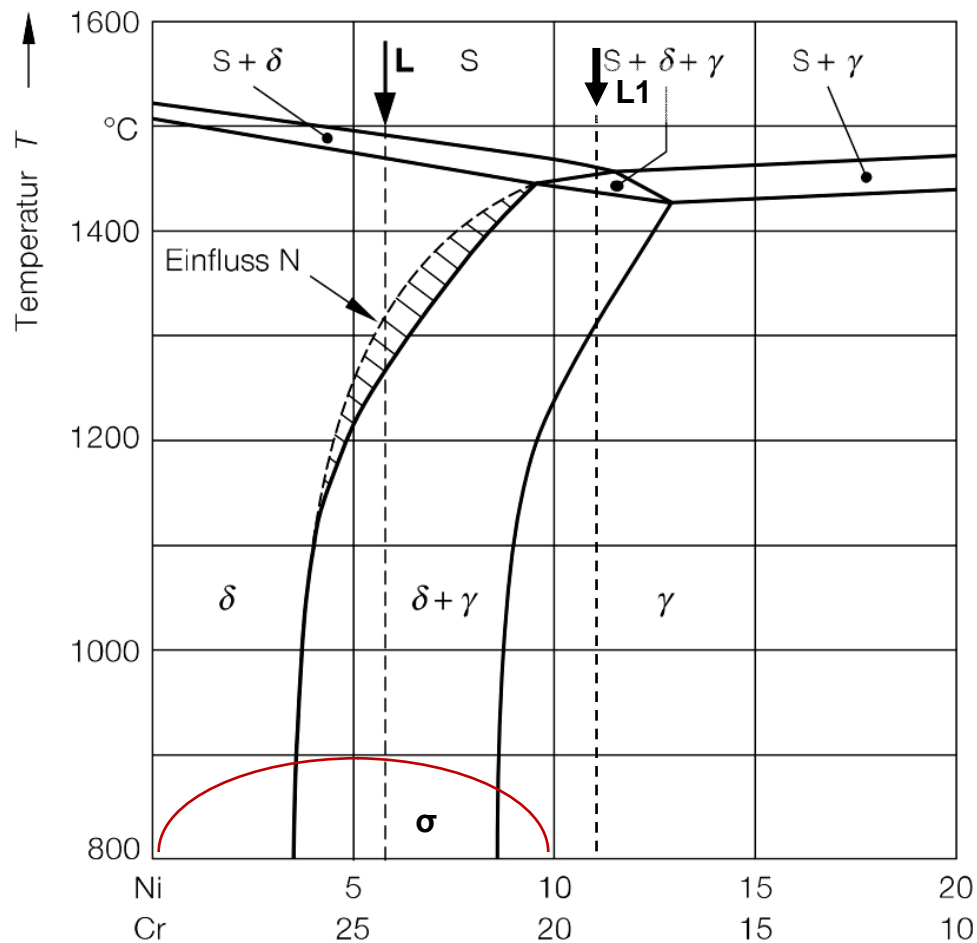
Mit Hilfe des in **Abbildung 6** dargestellten Schaeffler-Diagramms lässt sich durch die Berechnung der Chrom- und Nickeläquivalente die Gefügezusammensetzung bestimmen. Zwischen den Punkten 1 und 2 ist die Grenzlinie der Bereiche primärer austenitischer Erstarrung und primärer  $\delta$ (Delta)-ferritischer Erstarrung eingezeichnet. Diese gibt die Abhängigkeit der Umwandlungsart von der Konzentration der legierten Austenitbildner und Ferritbildner an. [10]



**Abbildung 6:** Schaeffler-Diagramm [8] [10]

In **Abbildung 7** ist ein Konzentrationsschnitt durch das Dreistoffgemisch Fe-Cr-Ni bei 70% Fe dargestellt. Die eingetragene Linie L1 zeigt den Verlauf der Umwandlungen der sich ausbildenden Gitterstrukturen. L1 durchläuft bei Abkühlung aus dem Solidusbereich zu einem sehr kleinen Teil das Gebiet Solidus +  $\delta$ -Ferrit, bevor es das Eutektikum durchläuft. Im Eutektikum beginnt auch die Umwandlung in austenitische Gitterstrukturen. Die geringe Menge an  $\delta$ -Ferrit bleibt erhalten.





**Abbildung 7:** Konzentrationschnitt im Dreistoff-Schaubild Fe-Cr-Ni bei 70 % Fe [10][5]

Legierungen mit einem Mindestgehalt von 18 % Cr und 8 % Ni sind auch bei Raumtemperatur und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt austenitisch. [9]

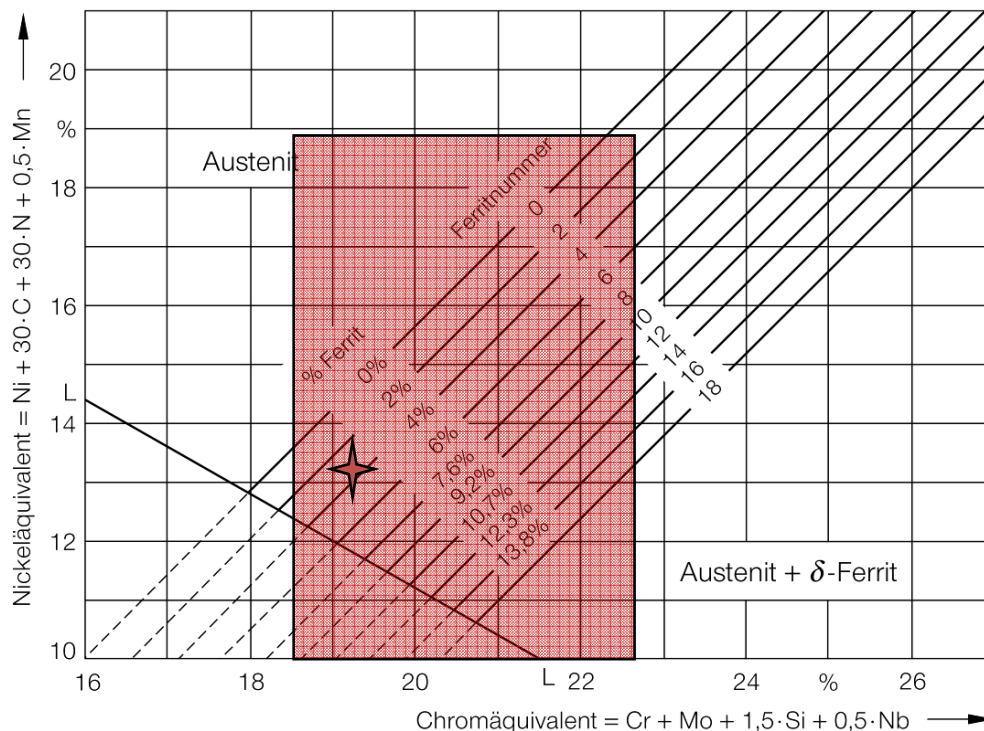
Sie können aber noch bis zu 10 %  $\delta$ -Ferrit enthalten. Der Restferritgehalt dieser metastabilen Austenite ist in vielen Fällen sogar wünschenswert, da die primärferritische Erstarrung die Heißrissanfälligkeit bei Blechdicken  $\geq 10$  mm deutlich reduziert. Austenite ohne  $\delta$ -Ferritanteil werden als Vollaustenite bezeichnet. [10]

Bei dünnen Blechen und der Forderung nach besonders hoher Korrosionsbeständigkeit wird meist ein  $\delta$ -Ferritgehalt von unter 3 % gefordert. [14]

Das Schaeffler-Diagramm ist mit einer Genauigkeit von  $\pm 4$  % für einen Volumenanteil von bis zu 15 %  $\delta$ -Ferrit für diesen Anforderungsbereich nicht mehr ausreichend. Um für hochlegierte Werkstoffe wie den X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) diese geringen Konzentrationen genauer vorherzusagen, kommt bei der Ermittlung das De Long-Diagramm oder das WRC-1992-Schaubild zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um detailliertere Auszüge aus dem Schaeffler-Diagramm.

Das De Long-Diagramm ist besonders für austenitische CrNi-Stähle geeignet. Der Grund liegt in der Anpassung der Gleichung für das Nickeläquivalent durch einbeziehen des Austenitbildners Stickstoff und die Einführung einer mit Ferrit-Standard-Eichproben arbeitenden Messmethode. Aus dieser Messmethode leiten sich auch die sogenannten Ferritnummern (FN) ab. Bis zu einem Volumenprozentanteil von 8 %  $\delta$ -Ferrit, was ca. einer FN 8 entspricht, gibt es eine gute Übereinstimmung der Ferritnummern mit den Prozentangaben.

**Abbildung 8** zeigt das De Long-Diagramm mit dem Toleranzfeld für einen X2CrNiMo17-12-2 (rot hinterlegtes Feld) und den Ferritgehalt (rotes Kreuz) einer Stahllieferung mit analysierten Legierungsanteilen.



**Abbildung 8:** De Long Diagramm mit eingetragenem Toleranzfeld für den Werkstoff X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) [10]

Die Angabe der Legierungsbestandteile und ihrer Konzentration kann in Form eines Werkzeugeignisses erfolgen (Anlage 1). Das Toleranzfeld und der spezifische Ferritgehalt wurde mit der Gleichung (3) und Gleichung (4) berechnet. Für Werkstoffe ohne Angabe des Stickstoffgehaltes ist für WIG-Prozesse ein Stickstoffgehalt von 0,06 % anzunehmen.

$$Cr_{\text{eq}} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (3)$$

$$Ni_{\text{eq}} = Ni + 30 \cdot C + 30 \cdot N + 0,5 \cdot Mn \quad (4)$$

Eine Schwäche besitzt das De Long-Diagramm bei der Einschätzung des Manganinflusses auf die Austenit in Martensitumwandlung, zudem wird der Ferritanteil in Form der FN bei hohen Konzentrationen überbewertet. [10]

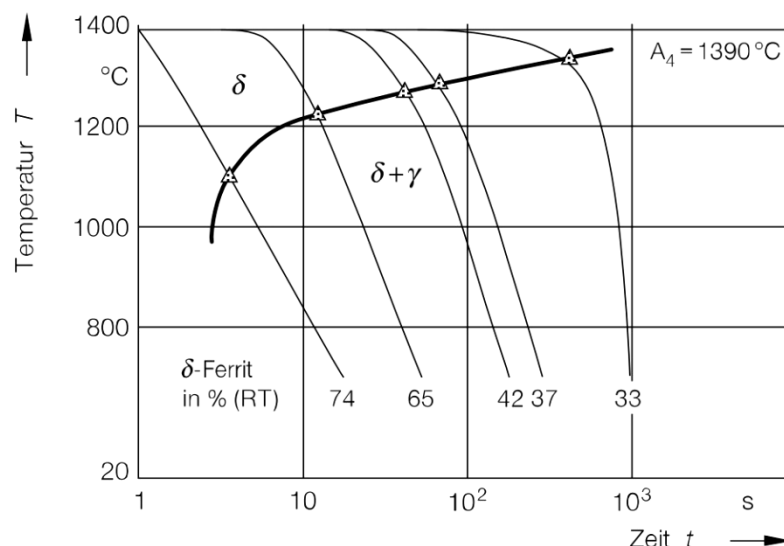
Diese Fehleinschätzungen sind bei dem neueren WRC-1992-Schaubild behoben.

Es eignet sich daher besonders für die Einschätzung von höchstlegierten Stählen. Besonders bei hohen Ferritgehalten, wie beispielsweise bei Duplex Stählen, bieten dieses Diagramm und die zugehörigen Formeln eine noch genauere Vorhersage des Ferritgehaltes bei hohen Konzentrationen. [10]

Für Mischverbindungen zwischen ferritischen und austenitischen Grundwerkstoffen ist das Schaeffler-Diagramm allerdings weiterhin am aussagekräftigsten, da bei diesem Diagramm eine grafische Ermittlung des gegebenenfalls notwendigen Zusatzwerkstoffes möglich ist. [10]

Im Bezug auf die Schweißarbeit bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt lässt sich eine Einschätzung der Schweißarbeit durch einen Auszug aus dem Dreistoffschaubild Fe-Cr-Ni sowie das ZTU-Schaubild für diese Zusammensetzung vornehmen. Der vertikale Schnitt bei L in **Abbildung 7** markiert die Gefügeänderungen beim Abkühlen aus dem Solidusbereich für einen Duplexstahl X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462). Die Linie L1 zeigt dagegen den oben erwähnten X2CrNiMo17-12-2 als Beispiel für einen metastabilen austenitischen CrNi-Stahl.

Für den X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) ist in **Abbildung 9** zusätzlich das zeittemperaturabhängige Umwandlungsverhalten aufgetragen. An diesem Werkstoff kann beispielhaft der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Gefügeausbildung gezeigt werden. So erhöht eine schnelle Abkühlung erheblich den  $\delta$ -Ferritanteil.



**Abbildung 9:** ZTU-Schaubild für den 1.4462 [10]

Da ZTU-Schaubilder werkstoffspezifisch sind, kann das Verhalten eines metastabilen Austenits wie dem X2CrNiMo17-12-2 anhand der **Abbildung 9** nur näherungsweise abgeschätzt werden. Die Erhöhung des Nickelgehaltes und gleichzeitige Reduzie-



rung des Chroms beim X2CrNiMo17-12-2, führt zu einer deutlichen Reduzierung des primärferritisch erstarrenden Gefüges.

Die Ausbildung anderer Gefügebestandteile bzw. Phasen sind bei technischen Abkühlgeschwindigkeiten, wie sie beim Schweißen auftreten, nicht zu erwarten. Durch die Absenkung der Umgebungstemperatur und die damit verbundene Steigerung des Abkühlgradienten ist demnach maximal mit einer leichten Erhöhung des Ferritanteils zu rechnen.

### 2.2.2 Schweißnahtunregelmäßigkeit: Anlauffarben

Anlauffarben werden in verschiedenen Normen im Zusammenhang mit hochlegierten Stählen erwähnt. Konkrete Aussagen darüber, ob und in welchem Maße Anlauffarben zulässig sind, finden sich dabei kaum.

Die Unterteilung der Schweißnahtunregelmäßigkeiten erfolgt nach DIN EN ISO 6520-1: 2007 in die folgenden Kategorien:

- Gruppe 1                      Risse
- Gruppe 2                      Hohlräume
- Gruppe 3                      Feste Einschlüsse
- Gruppe 4                      Bindefehler / ungenügende Durchschweißungen
- Gruppe 5                      Form und Maßabweichungen
- Gruppe 6                      Sonstige Unregelmäßigkeiten

Anlauffarben werden in die Gruppe 6 eingeordnet und unter den Referenznummern 610 Anlauffarben; 6101 Verfärbungen; 613 verzünderte Oberfläche geführt.

In der DIN 29595 wird die Unregelmäßigkeit Anlauffarben allgemein erwähnt und für hochlegierte austenitische Stähle sowie Nickel-Legierungen und Kobalt-Legierungen erfolgt die Aussage: „Nach Festlegung in den Bauunterlagen“. In der DIN EN 12502-4 werden Anlauffarben bis strohgelb als zulässig erklärt. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass unter bestimmten Bedingungen auch bei strohgelben Anlauffarben die Wahrscheinlichkeit für Korrosion erhöht sein kann. In der Norm zur Bewertung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten bei Stählen, der DIN EN ISO 5817: 2006, finden diese Unregelmäßigkeiten jedoch keine Berücksichtigung. [11][12][13]

Der Anwender oder Auftraggeber muss demnach selbst entscheiden, ob und in welcher Ausprägung Anlauffarben an Schweißnaht und WEZ belassen werden können. Für diese Entscheidung sind allerdings umfangreiche Kenntnisse der Eigenschaften von Anlauffarben im Bezug auf den verwendeten Werkstoff, sowie der Wechselwirkung mit korrosiven Medien im Einsatzbereich nötig. Für CrNi-Stähle sind im Folgenden die wesentlichen Merkmale von Anlauffarben aufgeführt.

### • Anlauffarben allgemein:

Als Anlauffarben (Anlaufsichten [15]) im Sinne von Schweißnahtunregelmäßigkeiten werden dünne, 25 bis 300 nm starke Mischoxidschichten im Bereich der Nahtwurzel und der Wärmeeinflusszone bezeichnet. Die unterschiedlichen Schichtstärken der Anlauffarben verursachen Interferenzen und Reflexionen im einfallenden Licht. Mit steigender Schichtdicke ändert sich die Farbgebung entlang des Temperaturgradienten senkrecht zur Naht.

Anlauffarben können sich auf den unterschiedlichsten Materialien beim Vorhandensein von Sauerstoff, Wasser oder Kohlendioxid bei Temperaturen über 200 °C (250 °C bei hochlegiertem Stahl) bilden. TAMMAN weist diesen Effekt 1920 bei den Metallen Silber, Kupfer, Blei, Thallium und Eisen nach. [21][24][34]

### • Erscheinungsbild

Anlauffarben können im Farbspektrum von hellgelb über rotbraun bis blaugrau auftreten. Die Schichtdicke und damit die Farbausprägung ist bei ihrer Entstehung von der Konzentration an Sauerstoff und der Oberflächentemperatur abhängig. **Abbildung 10** zeigt die Anlauffarbenausprägung bei bestimmten Sauerstoffkonzentrationen und vergleichbaren Temperaturverläufen. Die ohne Hilfsmittel erkennbaren Anlauffarben bilden sich erst ab einer Sauerstoffkonzentration von 50 ppm. [14][15][21][23]

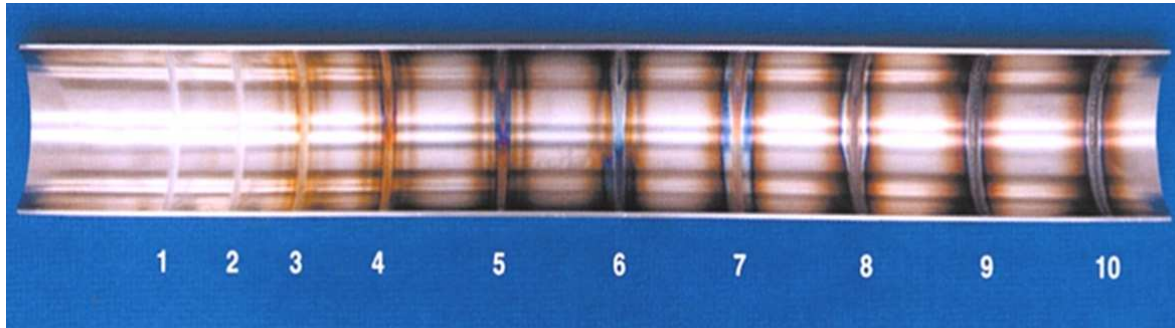
Beispiele für das Erscheinungsbild oder ein Grenzwert für durch Wasser bzw. Feuchte oder CO<sub>2</sub> verursachte Anlauffarben sind in der gesichteten Literatur nicht aufgeführt. Die Arbeiten zum Thema Anlauffarben beziehen sich bisher nur auf molekularen Sauerstoff als Ursache für die Bildung der Mischoxidschichten.

Die tatsächliche Farbgebung der einzelnen Schichtdicken ist dabei neben der Sauerstoffkonzentration, der Temperatur und der Zeit noch von anderen Faktoren abhängig. Eine entscheidende Rolle spielt außerdem die Oberflächenbeschaffenheit. Wie in **Abbildung 11** dargestellt, unterscheiden sich die erzeugten Anlauffarben trotz vergleichbarem Temperaturverlauf und Sauerstoffkonzentration aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenrauheit. Eine größere Rauheit führt einerseits zu einer größeren Reaktionsfläche, andererseits kann der an der Oberfläche haftende Sauerstoff schlechter verdrängt werden. Diese Faktoren begünstigen die Bildung von Anlauffarben zusätzlich. [15] [10]

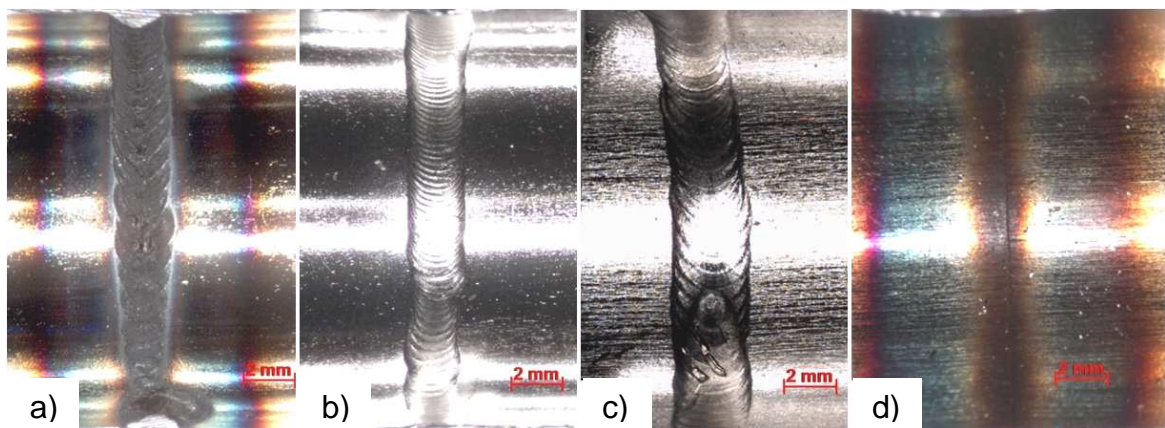
Die rauere Oberfläche bewirkt außerdem eine diffusere Reflexion des einfallenden Lichtes. Die vorhandenen Anlauffarben wirken dadurch matter und etwas dunkler.

Einen weiteren wichtigen Faktor bildet das auftreffende Licht selbst. Wird die Sichtprüfung beispielsweise in einem von Leuchtstoffröhren erhellten Raum durchgeführt so kann die Farberkennung darunter leiden, denn Leuchtstoffröhren haben, im Ge-

gensatz zu Glühlichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum, nur ein Linienspektrum.  
[36] (Anlage 2)  
Verschiedene Farbtöne sind dadurch stärker, andere nur schwach sichtbar.



**Abbildung 10:** Ausbildung von Anlauffarben in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration bei gleichen Temperaturregimen; Sauerstoffkonzentrationen: 1→10 ppm; 2→25 ppm; 3→50 ppm; 4→100 ppm; 5→200 ppm; 6→500 ppm; 7→1000 ppm; 8→5000 ppm; 9→12500 ppm; 10→25000 ppm [35]



**Abbildung 11:** Beispielbilder für: a) Anlauffarben durch Sauerstoff (ca. 12000 ppm) an einem elektropolierten CrNi-Stahlrohr (Mittenrauheit  $\leq 0,25 \mu\text{m}$ ); b) anlauffarbenfreie Nahtwurzel eines elektropolierten CrNi-Stahlrohres; c) Rohroberfläche eines CrNi-Stahlrohres; d) Anlauffarben durch Sauerstoff (ca. 12000 ppm) auf Rohroberfläche (Mittenrauheit  $\leq 1 \mu\text{m}$ )

Sollen vorhandene Anlauffarben durch eine Sichtprüfung bewertet werden, ist es wichtig, die richtigen Lichtverhältnisse herzustellen bzw. festzulegen. Denn nur bei optimalen bzw. konstanten Lichtverhältnissen ist die Klassifizierung der Schichtdicke anhand der sichtbaren Interferenz- und Brechungserscheinungen möglich. So kann ein nach der Vereinbarung mit dem Auftraggeber noch zulässiges hellgelb durch ungünstige Lichtverhältnisse als strohgelb erscheinen und dadurch Nacharbeit erforderlich machen. Andererseits kann bei der Forderung nach Anlauffarbenfreiheit ein leichter Gelbton übersehen werden (falsches Leuchtmittel) und bei starken korrosiven Beanspruchungen zum Bauteilversagen führen.

Eine Hilfestellung für die richtige Auswahl des Leuchtmittels liefert die DIN EN 12464-1 und 2. Hierfür wird die Lichtfarbe in Abhängigkeit von der Temperatur eines schwarzen Strahlers angegeben. So hat ein Glühstrahler eine Farbtemperatur bis

$\leq 3300$  K, eine Leuchtstoffröhre 3300 bis 5300 K und spezielle Tageslichtlampen eine Farbtemperatur von über 5300 K.

Ein weiteres Merkmal bildet der Farbwiedergabeindex. Der  $R_a$ -Wert gibt den Unterschied der Farbwiedergabequalität gegenüber einem schwarzen Strahler an. Der maximal Wert liegt bei  $R_a = 100$ . Weist ein Strahler eine geringere Farbwiedergabequalität bei gleicher Farbtemperatur auf, sinkt der  $R_a$ -Wert. [36][38][39][40]

In DIN EN ISO 12464-2 wird als Beleuchtungsanforderung für die Sehaufgabe „anspruchsvolle Elektro-, Maschinen- und Rohrinstallation sowie Inspektionen“ ein  $R_a$ -Wert von 60 angegeben. Da es bei der Prüfung der Anlauffarbenfreiheit auch auf feine Nuancen ankommt, ist ein  $R_a$ -Wert  $>80$  empfehlenswert. [37]

Mit diesen beiden Werten kann eine Lichtquelle festgelegt werden, unter der die einzelnen Schichtdicken annähernd die gleiche Farbausprägung zeigen. Der Farbwiedergabewert und die Farbtemperatur sind auf Leuchtmitteln mit internationaler Farbbezeichnung vermerkt. (Anlage 3)

Weitere Faktoren bilden die Beleuchtungsstärke, das Kontrastverhältnis sowie der Blickwinkel und der Einstrahlungswinkel.

Die Festlegung eines Referenzsystems zu Erkennung von grenzwertigen Farbausprägungen wie z. B. strohgelb wird durch die Vielzahl von Einflussfaktoren erschwert. Idealerweise müsste für jeden verwendeten Werkstoff mit den jeweiligen Oberflächenrauigkeiten eine Referenzprobe angefertigt werden. Desweiteren muss der Vergleich unter einer Lichtquelle mit festgelegter Farbtemperatur und Farbwiedergabewert erfolgen. Diese Anforderungen sind in der Praxis nur schwer zu erfüllen, weshalb meist eine vollständige Entfernung der Anlauffarben nach Beendigung des Schweißprozesses gefordert wird, oder direkt anlauffarbenfreie Nähte herzustellen sind. [15][23]

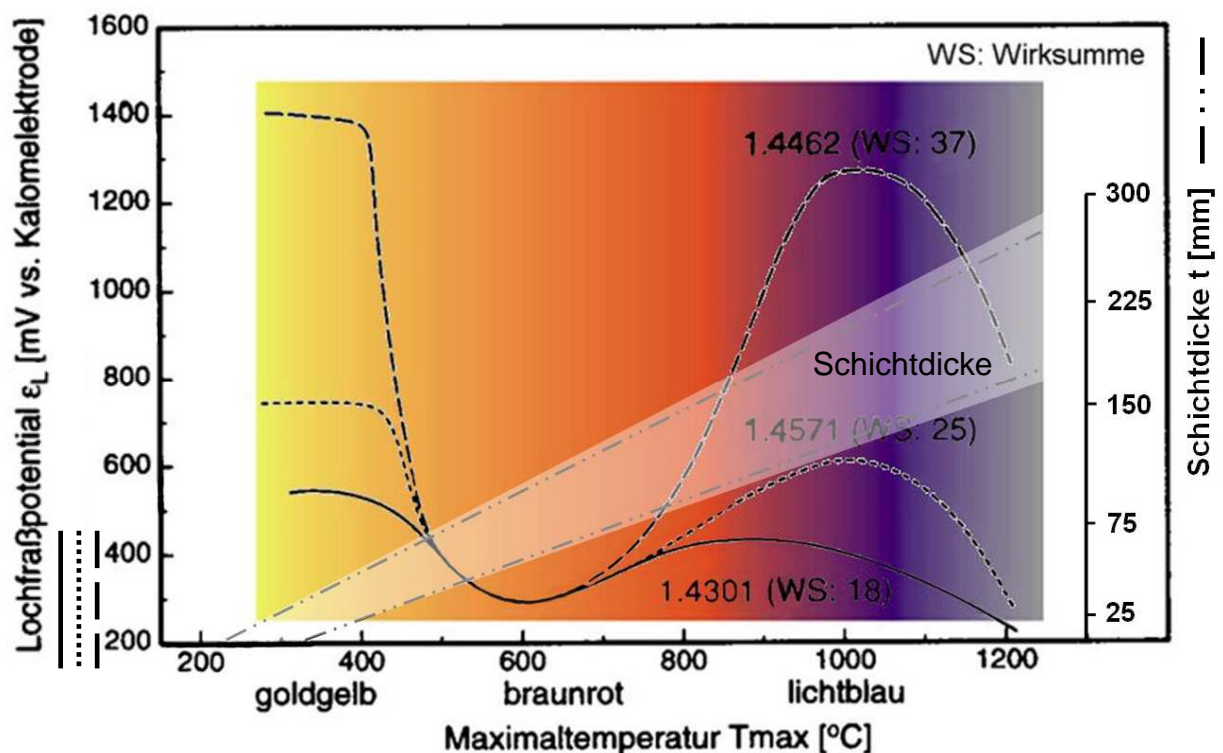
- **Korrosive Eigenschaften:**

Bei den korrosionsbeständigen Stählen kommt diesem Effekt eine besondere Bedeutung zu. Das Entstehen der Mischoxidschichten zerstört die schützende Chromoxidschicht, und verursacht, abhängig von der Schichtdicke, eine Herabsetzung des Lochfraßpotenzials. Das Lochfraßpotenzial nimmt allerdings nicht kontinuierlich über den Farbverlauf ab. Der Zusammenhang zwischen Anlauffarbe und Lochfraßpotenzial ist in **Abbildung 12** dargestellt. Die Reduzierung des Lochfraßpotenzials bedeutet eine stärkere Anfälligkeit gegenüber der Lochfraßkorrosion. Bei Schichtdicken über 50 nm, d. h. goldgelber Färbung, kommt es zu einer deutlichen Absenkung des Potenzials. Bei einer Schichtdicke von 75-100 nm erreicht es sein Minimum. Der Werkstoff ist in diesem Bereich, unabhängig von den Legierungselementen, am stärksten gefährdet. Ursache ist das entstandene Ungleichgewicht zwischen Chromoxiden und Eisen-Mischoxiden. Im Bereich bis



50 nm liegt ein Verhältnis von  $>1$  vor. Im rotbraunen Bereich ändert sich das Verhältnis zu einem Wert  $<1$ , der Eisen-Mischoxidanteil überwiegt. [15][21][26]

Steigt die Schichtdicke weiter, nimmt das Potenzial wieder zu. Dieser Effekt wird mit den bei höheren Temperaturen schneller stattfindenden Diffusionsprozessen erklärt. Speziell das Chrom kann in diesem Temperaturbereich schneller und insgesamt länger diffundieren. Es kommt zu einem Konzentrationsausgleich des Volumens mit der Oberfläche und das Verhältnis Chromoxid zu Eisen-Mischoxid liegt im Verhältnis  $\geq 1$  vor. [15][26]



**Abbildung 12:** Lochfraßpotenzial im Verhältnis zur Bildungstemperatur der Anlauffarben und der möglichen Schichtdicke [21] [23]

Die bereits erwähnte Lochfraßkorrosion tritt besonders im Zusammenhang mit Chloridionen enthaltenden, elektrolytischen Lösungen auf. Die Chloridionen senken das Lochfraßpotenzial zusätzlich, da sie als Katalysator wirken und mit den Metallkationen der Oxidoberfläche Übergangskomplexe bilden. Die Übergangskomplexe haben eine wesentlich höhere Löslichkeit als das ursprüngliche Metalloxid. Der Werkstoff geht dabei vom passiven in den transpassiven Zustand über, der durch einen exponentiellen Stromdichteanstieg, verursacht durch die starke Materialauflösung, gekennzeichnet ist. Durch die im Elektrolyt gelösten Halogenide ( $\text{Cl}^-$ ;  $\text{J}^-$ ;  $\text{Br}^-$ ) wird das Aufreißen der Passivschicht bzw. der Oxidschicht mit Übergangskomplexen und das Bilden von Löchern unterstützt. [15]

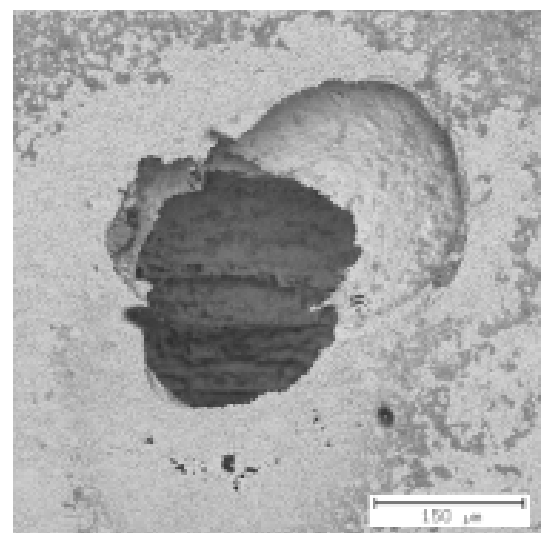
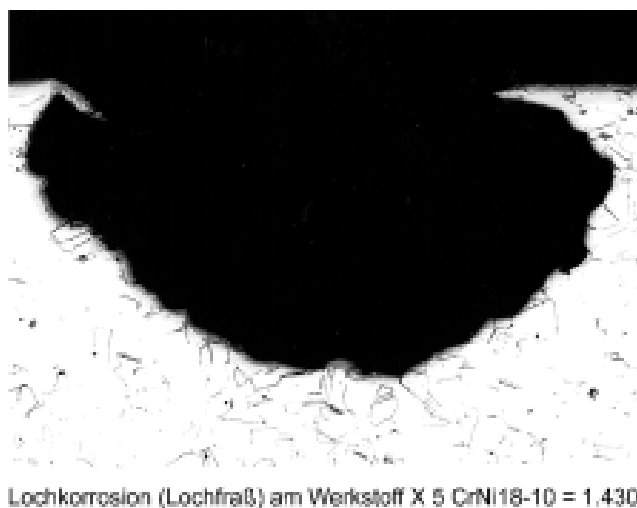
Die verbliebene Oxidschicht führt zu einer elektrischen Trennung des als Anode geschalteten Grundwerkstoffes im freigelegten Bereich und der als Katode

wirkenden Oberfläche der Oxidschicht. Durch die im Verhältnis zum Korrosionsloch sehr große Oberfläche entsteht ein Potenzialunterschied. Dieser führt zu einem sehr schnellen Auflösen des als Anode geschalteten Grundwerkstoffes. Zusätzlich bildet sich durch freiwerdende Wasserstoffionen im Inneren des Korrosionsloches Salzsäure aus den Chloridionen. Der Prozess ist in diesem Stadium bei Verfügbarkeit eines Elektrolyt selbsterhaltend. Neben Anlauffarben können auch Inhomogenitäten wie Ausscheidungen, Einschlüsse und mechanische Zerstörungen der Passivschicht Ausgangspunkt für Lochfraßkorrosion sein. [15]

Ein Beispiel für Lochfraßkorrosion ist in **Abbildung 13** zu sehen.

Ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines CrNi-Stahls gegen Lochfraß ist die Wirksumme. Sie wird durch eine empirisch entwickelte Formel berechnet, die in Gleichung (5) wiedergegeben ist. X nimmt dabei einen Wert zwischen 1 und 30 an und ist abhängig von der Legierungszusammensetzung. Höchstlegierte Stähle wie der Stahl X1NiCrMoCu25-20-5 profitieren mehr von einer Stickstoffzulegierung als ein relativ niedrig legierter X2CrNiMo17-12-2. So würde für den X1NiCrMoCu25-20-5 ein Wert von 30 einzutragen sein, während der X2CrNiMo17-12-2 mit einem Wert von 16 berechnet wird. [23]

$$WS = \%Cr + 3.3 \cdot \%Mo + X \cdot \%N \quad (5)$$



**Abbildung 13:** Ausprägung einer Lochkorrosion am Beispiel des Werkstoffes X5CrNi18-10 [5]

## 2.3 Prozess- und Wurzelschutzgase

Abhängig vom jeweiligen Schweißprozess und Schweißaufgabe, muss aus einer Vielzahl am Markt angebotener Produkte das richtige Gas oder Gasgemisch ausge-

wählt werden. Im Gegensatz zu Standardschweißaufgaben muss beim Schweißen von korrosionsbeständigen Stählen nicht nur eine Auswahl des Prozessgases erfolgen, auch die Auswahl und Anwendung eines Wurzelschutzgases ist in den meisten Fällen sinnvoll, um kostenintensive Nacharbeiten in der WEZ zur Wiederherstellung der Korrosionsbeständigkeit zu vermeiden. Im Folgenden werden geeignete Gase für das WIG-Schweißen von austenitischen CrNi-Stählen erläutert.

### 2.3.1 Prozessgase

Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete WIG-Schweißprozess (Ordnungsnummer: 142) [16] benötigt für die Ausbildung eines stabilen Lichtbogens zwischen der Elektrode und dem Werkstück ein Prozessgas [16], welches durch eine gute Ionisierbarkeit die Ausbildung eines Plasmas und damit die Übertragung von Ladungsträgern und Energie in Form von Wärme und Kraft, ermöglicht. [18]

Eine weitere Aufgabe des Prozessgases besteht in der Abschirmung der Wärmeeinflusszone entlang der Schweißnaht und des Schweißgutes vor der Atmosphäre. [6]

Die Wahl des zu verwendenden Prozessgases ist beim Standard-WIG-Verfahren (141) [17] hauptsächlich von dem zu bearbeitenden Werkstoff abhängig.

Dabei ist Argon das am häufigsten verwendete Prozessgas, da es als inertes Gas für alle Werkstoffe geeignet ist. Weiter für verschiedene Werkstoffe häufig angewendete Gase sind in Tabelle 1 aufgeführt, wobei die Gasgemische mit reduzierender Komponente hauptsächlich für den mechanisierten Bereich bestimmt sind. [5][6][22]

Die Reinheit des verwendeten Prozessgases muss dabei mindestens 99,5 % betragen, um eine Oxidation der Elektrode zu verhindern [6]. Spezielle Anforderungen oder Werkstoffe können ein Prozessgas mit einer höheren Reinheit erforderlich machen.

Nach DIN EN ISO 14175 können als nicht Oxidierende Prozessgase die Gase und Gasgemische der Hauptgruppen I - inerte Gase, R - reduzierende Gase, N - reaktionsträge Gase und Z - Mischgasen mit Komponenten die nicht der Norm aufgeführt sind verwendet werden. [19]

So kann z. B. zur Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ein Gasgemisch aus Argon-Helium (I3) anstatt aus reinem Argon (I1) verwendet werden. Durch die Zumischung des Heliums wird die Streckenenergie erhöht, sodass bei gleichbleibender Materialdicke eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ermöglicht wird. [2]

Dieses Beispiel zeigt, dass durch eine gezielte Auswahl der Mischgaskomponenten die Eigenschaften des Lichtbogens in erheblichem Maße beeinflusst werden können. In Tabelle 2 ist eine Auswahl der wichtigsten physikalischen Eigenschaften der für schweißtechnische Anwendungen relevanten Gase abgebildet. Weitere Entscheidungsmerkmale bieten die in **Abbildung 14** gezeigten Einbrandprofile.

**Tabelle 1:** International gebräuchliche Prozessgase für das WIG-Schweißen [1]

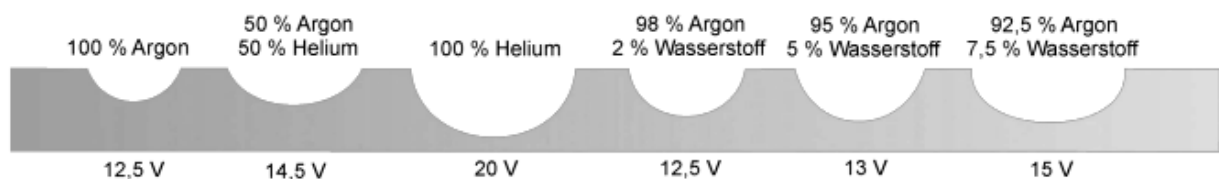
Metall	Prozessgasgemische					
	Argon	Argon + H <sub>2</sub>	Helium	Helium/ Argon	Stickstoff	Argon/ Stickstoff
unlegierter Stahl	●					
Vergütungsstahl	●			○		
niedriglegierter Stahl	●			●		
hochlegierter Stahl (außer Duplexstahl)	●	●	○	○		○
Duplexstahl	●		○	○		○
Aluminium und Al-Legierungen	●		●	●		
Kupfer und Kupfer- legierungen	●		●	●	○	○
Nickelbasiswerk- stoffe	○	●		○		
Titan- und Magne- sium Werkstoffe	●		○			
<p>● am häufigsten eingesetzt</p> <p>○ ebenfalls gebräuchlich</p>						



**Tabelle 2:** Physikalische Eigenschaften schweißstechnisch relevanter Gase [19]

Gasart	Chemisches Zeichen	Dichte <sup>a</sup> (Luft = 1,293) kg/m <sup>3</sup>	Relative Dichte <sup>a</sup> zu Luft	Siedetemperatur bei 0,101 MPa °C	Reaktionsverhalten während des Schweißens
Argon	Ar	1,784	1,380	−185,9	inert
Helium	He	0,178	0,138	−268,9	inert
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	1,977	1,529	−78,5 <sup>b</sup>	oxidierend
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	1,429	1,105	−183,0	oxidierend
Stickstoff	N <sub>2</sub>	1,251	0,968	−195,8	reaktionsträge <sup>c</sup>
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	0,090	0,070	−252,8	reduzierend

<sup>a</sup> Gilt für 0 °C und 0,101 MPa (1,013 bar).  
<sup>b</sup> Sublimationstemperatur (Übergangstemperatur vom festen in den gasförmigen Zustand).  
<sup>c</sup> Das Verhalten von Stickstoff verändert sich je nach Werkstoff und Anwendungsfall. Mögliche Einflüsse müssen vom Anwender beachtet werden.



**Abbildung 14:** Einbrandprofile handelsüblicher Gase und Gasgemische; WIG-Schweißen, 5 mm Blechdicke, 130 A, Lichtbogenlänge 4 mm, Schweißgeschwindigkeit 15 cm/min [5]

Die aus neueren Veröffentlichungen bekannten Zusammenhänge zwischen der Gas-temperatur und der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Gase erleichtern die Auswahl vorteilhafter Gase und Gasgemische für Anwendungen zusätzlich. Eine entsprechende Übersicht ist im Anhang (Anlage 4) beigelegt.

Neben dem Reaktionsverhalten und der Wärmeleitfähigkeit gehört die chemisch/metallurgische Wirkung der einzelnen Gaskomponenten zu den wichtigsten Gaseigenschaften. [5][7]

Umfangreiche Forschungsarbeiten an der TU Dresden der Professur Fügetechnik und Montage zum Thema „Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf den Lichtbogen“ ermöglichen unter anderem eine Einteilung der Gase nach ihren Wirkungen auf den Lichtbogen (Staudruck und Gesamtwärmeeinbringung) und den zugrunde liegenden physikalischen Eigenschaften.

Für die wichtigsten Mischgaskomponenten ist eine entsprechende Übersicht in Tabelle 3 angegeben.

**Tabelle 3:** Wirkung der Gase Helium, Wasserstoff und Stickstoff als Komponenten eines Mischgases [20]

		Lichtbogeneigenschaften	
		Staudruck	Gesamtwärmeeinbringung
He- Zumischung	Effekt	Verringerung in Abhängigkeit von Lichtbogenlänge LBL klein: Staudruckminderung gering LBL groß: Staudruckminderung groß	Erhöhung ↑↑
	Ursache	Viskosität thermische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie ( $\rho$ , $c_p$ , $M$ )	thermische Leitfähigkeit elektrische Leitfähigkeit
H <sub>2</sub> - Zumischung	Effekt	Erhöhung	Erhöhung ↑
	Ursache	Viskosität thermische Leitfähigkeit elektrische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie ( $\rho$ , $c_p$ , $M$ )	thermische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie ( $\rho$ , $c_p$ , $M$ )
N <sub>2</sub> - Zumischung	Effekt	Erhöhung	Erhöhung ↑
	Ursache	Größen der inneren Energie ( $\rho$ , $c_p$ , $M$ )	thermische Leitfähigkeit Größen der inneren Energie ( $\rho$ , $c_p$ , $M$ )

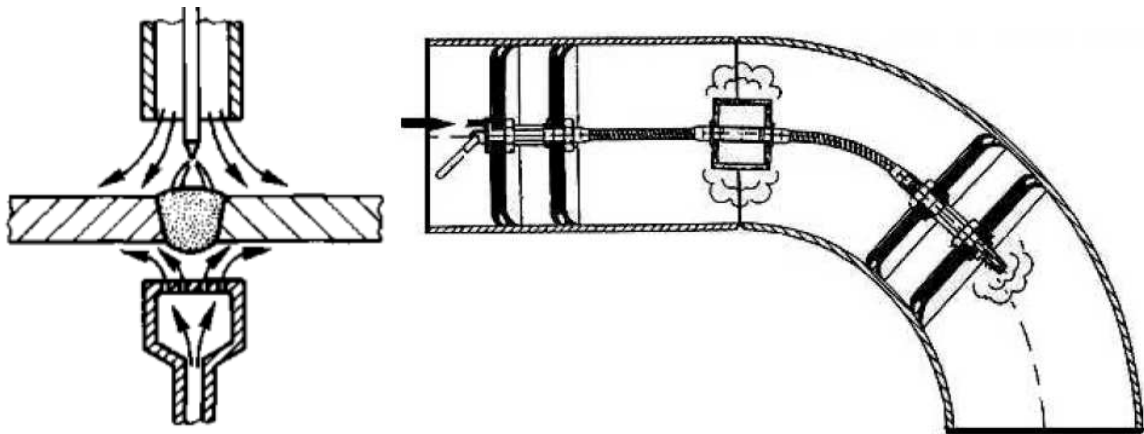
### 2.3.2 Wurzelschutzgase

Die Gefahr des Legierungsabbrandes und der Bildung von Anlauffarben besteht auch wurzelseitig. Dies kann durch das Formieren der Nahtwurzel mit reduzierenden (Formiergasen [24]), inerten oder reaktionsträgen Gasen verhindert werden. In **Abbildung 15** ist die prinzipielle Vorgehensweise bei Blechen und Rohren abgebildet.

Die Eignung der verfügbaren Gase ist dabei hauptsächlich vom Werkstoff und der späteren Verwendung des Rohres abhängig. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der geeigneten Gase und Gasgemische.

Bei den genannten Gasen und Gasgemischen kommen zwei Ansätze zur Vermeidung oder Verringerung der durch Sauerstoff verursachten Anlauffarben zum Tragen. Beim Einsatz der reaktionsträgen oder inerten Gase wie Stickstoff und Argon wird durch Spülen des wärmebeeinflussten Bereiches die Restsauerstoffkonzentration unter den Grenzwert der für den jeweiligen Fall festgelegten zulässigen Anlauffarbenausbildung eingestellt. Ein Beispiel für Anlauffarben mit wenig oder gar keinem Wurzelschutz zeigt **Abbildung 11 a)** und **d)**.

Bei den reduzierend wirkenden Gasgemischen wie Argon/Wasserstoff und Stickstoff/Wasserstoff findet zusätzlich noch eine Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser statt, was den Sauerstoffgehalt in der wärmebeeinflussten Zone verringert.



**Abbildung 15:** Prinzip Wurzelschutz bei Blechen und Rohren [24][21]

**Tabelle 4:** Schutzgastypen, Anwendungsgebiete und Eigenschaften [21][24]

Prozess- gas	Werkstoff	Wirkung
Argon	alle Werkstoffe	inerte Wirkung; sehr guter Schutz vor atmosphärischen Einflüssen; geeignet für alle gasempfindlichen Werkstoffe; reduziert den Wurzeldurchhang durch Erhöhen der Oberflächenspannung
Ar/H <sub>2</sub> - Gemische	austenitische CrNi-Stähle Ni und Ni-Basis-Werkstoffe	reduzierende Wirkung; nicht für wasserstoffempfindliche Werkstoffe geeignet; verbessert die Benetzung der Fugenflanken durch Absenken der Oberflächenspannung; →günstigere Wurzel Ausbildung
N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> – Gemische	Stähle (Ausnahme hochfeste Feinkornbaustähle), austenitische Stähle (Ausnahme Ti-stabilisierte Stähle)	reduzierende Wirkung; nicht für wasserstoffempfindliche Werkstoffe geeignet; Stickstoffanteil führt bei Ti-stabilisierten Austeniten zu einer Gelbfärbung der Wurzel → Titanitride und Stickstoffanreicherung, welche eine Kompensation einer möglichen Chromverarmung bewirken
N <sub>2</sub> und Ar/N <sub>2</sub> - Gemische	austenitische CrNi-Stähle, Duplex- und Superduplex- Werkstoffe	Austenitbildner Stickstoff reagiert bei hohen Temperaturen mit dem Metall → Einstellen des Ferritanteils bei Duplexwerkstoffen

In einigen Quellen wird zusätzlich auf den negativen Einfluss von Feuchte hingewiesen. So kann bei ungeeigneten Schlauchmaterialien Feuchte durch den Schlauchmantel eindringen und das Prozess- oder Wurzelschutzgas kontaminieren [25]. Das Vorhandensein von CO<sub>2</sub> oder Feuchtigkeit kann dabei ebenfalls zu Anlauffarben führen [21] [26]. Eine Spezifizierung, ab welcher Konzentration diese Anlauffarben entstehen, wird nicht vorgenommen. Es sind auch keine Arbeiten bekannt, die sich genauer mit den Auswirkungen einer erhöhten Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas befassen.

Besondere Anforderungen, wie z. B. anlauffarbenfreies Schweißen im Rohrleitungsbau, erfordert eine höhere Reinheit der Wurzelschutzgase. Denn anders als beim Schweißen von hochlegiertem Stahlblech, ist das nachträgliche Entfernen der Anlauffarben nur mit deutlich erhöhtem Aufwand möglich. Die unzugänglichen Nähte sind meist nur noch durch eine komplette Spülung des Rohrs mit Beizmittel zu entfernen.

Besondere Anforderungen an die Oberflächengüte der Rohrrinnenfläche könnte allerdings auch den Einsatz der in **Abbildung 15** gezeigten Wurzelschutzgaskammer verhindern, da die Dichtungslamellen die Oberfläche des Rohres bei der Entnahme nachhaltig schädigen können. Hierzu zählen die in Abbildung 11 b) dargestellten elektropolierten Rohroberflächen. In diesem Fall sollte nach Möglichkeit die Technik der Verdrängungsspülung zum Einsatz kommen, um den Gasverbrauch beim Spülen des gesamten Rohrabschnittes so gering wie möglich zu halten. Durch das laminare Einströmen des Gases kommt es nur zu einer geringen Vermischung mit der im Rohr vorhandenen Sauerstoff (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) enthaltenden Atmosphäre. Im Idealfall kann mit einem Spülfaktor von 2,3 des benötigten Wurzelschutzgasvolumen zum Rohrvo-lumen gearbeitet werden. [24]

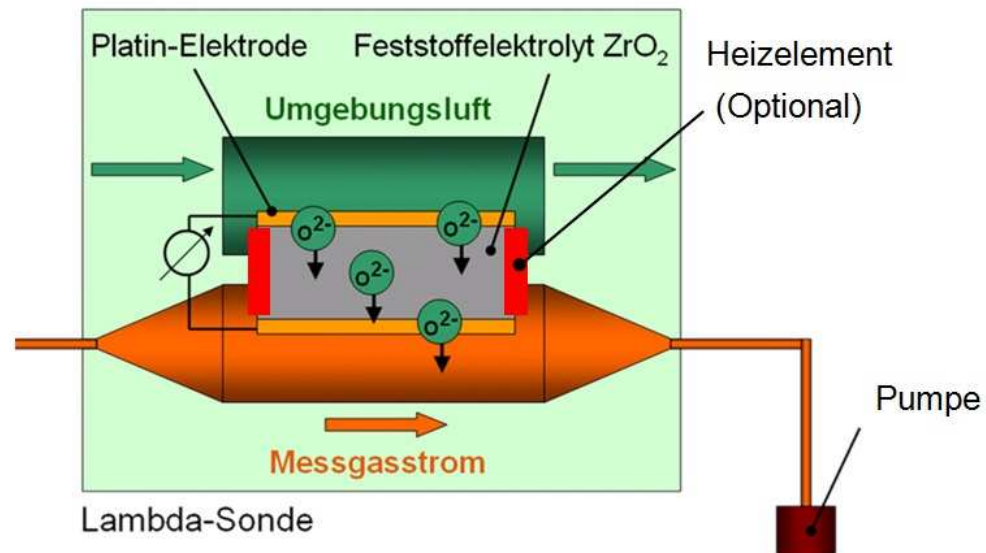
## 2.4 Messung von Sauerstoff und Feuchte bei schweißtechnischen Anwendungen

Für eine qualitativ hochwertige Schweißnaht ist das Einhalten von Grenzwerten an Verunreinigungen im Prozess- als auch im Wurzelschutzgas Grundvoraussetzung. Die Möglichkeiten zum Messen der Restkonzentration an Sauerstoff und Feuchte werden im Folgenden betrachtet.

- **Sauerstoff**

Für die Messung der Sauerstoffkonzentration in der Orbitalschweißtechnik bieten verschieden Hersteller standardisierte Lösungen an. Unterschiede gibt es hauptsächlich in der Bedienbarkeit, der Genauigkeit und der Reaktionsgeschwindigkeit.

Die Messwertgebung erfolgt häufig durch eine Lambdasonde mit einer Zirkoniumdioxid-Membran. Der prinzipielle Aufbau ist in **Abbildung 16** dargestellt. Das Messsignal besteht aus der Spannung der beiden Kontaktierungen der Zirkoniumdioxid-Membran. Ändert sich die Sauerstoffkonzentration an einer der Kontaktierungsflächen, ändert sich die anliegende Spannung. [27]



**Abbildung 16:** Aufbau einer Lambdasonde zur Sauerstoffkonzentrationsmessung [28]

- **Feuchte**

Die Messung der Luftfeuchte, das heißt, der in der Umgebungsluft enthalten dampfförmigen Wassermenge, geschieht häufig in Form der relativen Luftfeuchte oder allgemeiner der relativen Feuchte. Sie ist das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Sättigungsdruck. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (6) wiedergegeben. [29]

$$\varphi = \frac{p_d}{p_s} \quad (6)$$

Die relative Feuchte ist von der Umgebungstemperatur und dem Umgebungsdruck abhängig. Erst bei Kenntnis dieser beiden zusätzlichen Größen ist die Berechnung des tatsächlichen Wassergehaltes möglich. Dies erschwert eine genaue Messung wie sie für technische Prozesse teilweise entscheidend ist, da nicht nur der Messfehler des Feuchtemessgerätes berücksichtigt werden muss, sondern auch die Fehler bei der Messung der Umgebungstemperatur und des Luftdrucks. [29]

Ein präziseres Verfahren stellt die Messung des Tau- oder Frostpunktes an einer gekühlten Fläche dar. Der über die Fläche geleitete Luftstrom kühlt ab, wodurch sich die relative Feuchtigkeit des Gasvolumens direkt über der gekühlten Fläche erhöht.

Wird der Sättigungsdampfdruck überschritten, also der maximale Teildruck des Wasserdampfes (Partialdruck) der bei einer bestimmten Temperatur möglich ist, kondensiert ein Teil des Wassers auf der gekühlten Fläche aus. Der Zeitpunkt der Kondensatbildung im Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur der gekühlten Fläche ist dabei das Maß für den Taupunkt und somit eine von der Gastemperatur entkoppelte Möglichkeit zur Ermittlung des Feuchtegehaltes.

Die Abhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes von der Temperatur ist eine Naturkennlinie und lässt sich über Gleichung (7) (Sättigungsdruckkurve über Wasser bei  $0\text{ °C} < t < 30\text{ °C}$ ) und Gleichung (8) (Sättigungsdruckkurve über Eis  $-20\text{ °C} < t \leq 0\text{ °C}$ ) näherungsweise ermitteln. [29]

$$p_s = 288,68 \cdot \left( 1,098 + \frac{t}{100\text{ °C}} \right)^{8,02} \quad (7)$$

$$p_s = 4,689 \cdot \left( 1,486 + \frac{t}{100\text{ °C}} \right)^{12,3} \quad (8)$$

**Abbildung 17** zeigt den Zusammenhang zwischen Wasserdampf in gesättigter Luft und der zugehörigen Lufttemperatur bei verschiedenen Drücken.

Die Kenntnis des Taupunktes (Drucktaupunkt bei der Messung in Druckluftleitungen) ermöglicht die Steuerung eines Prozesses ohne die Kondensation von Feuchte auf Oberflächen und Messmitteln der Anlage. Die Kenntnis des Taupunktes ist ebenfalls bei Trocknungsvorgängen von Bedeutung, da nur Gase mit niedrigem Taupunkt, also einer geringeren absoluten Feuchte, Wasser von der Oberfläche eines Trockengutes aufnehmen können. Auch in der Schweißtechnik ist der Taupunkt, und damit die absolute Feuchte, von Bedeutung. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 erwähnt, ist zur Vermeidung von Anlauffarben auf eine möglichst trockene Oberfläche der WEZ zu achten. Da diese vom Wurzelschutzgas überströmt wird, muss auch das Wurzelschutzgas möglichst trocken sein, um die Oberfläche im Bereich der WEZ nicht mit Feuchtigkeit zu kontaminieren und eine möglicherweise vorhandene Feuchtigkeit aufzunehmen. So ist in der DIN EN ISO 14175 die Reinheit und der Feuchtigkeitsgehalt für Prozessgase bei Schweißtechnischen Anwendungen festgelegt. Das für das gepulste WIG-Orbitalschweißen hauptsächlich eingesetzte Gas der Hauptgruppe I muss demnach eine Mindestreinheit von 99,99 % aufweisen und darf nicht mehr als 40 ppm Feuchte enthalten, was einem Taupunkt von  $-50\text{ °C}$  bei  $0,101\text{ MPa}$  entspricht.

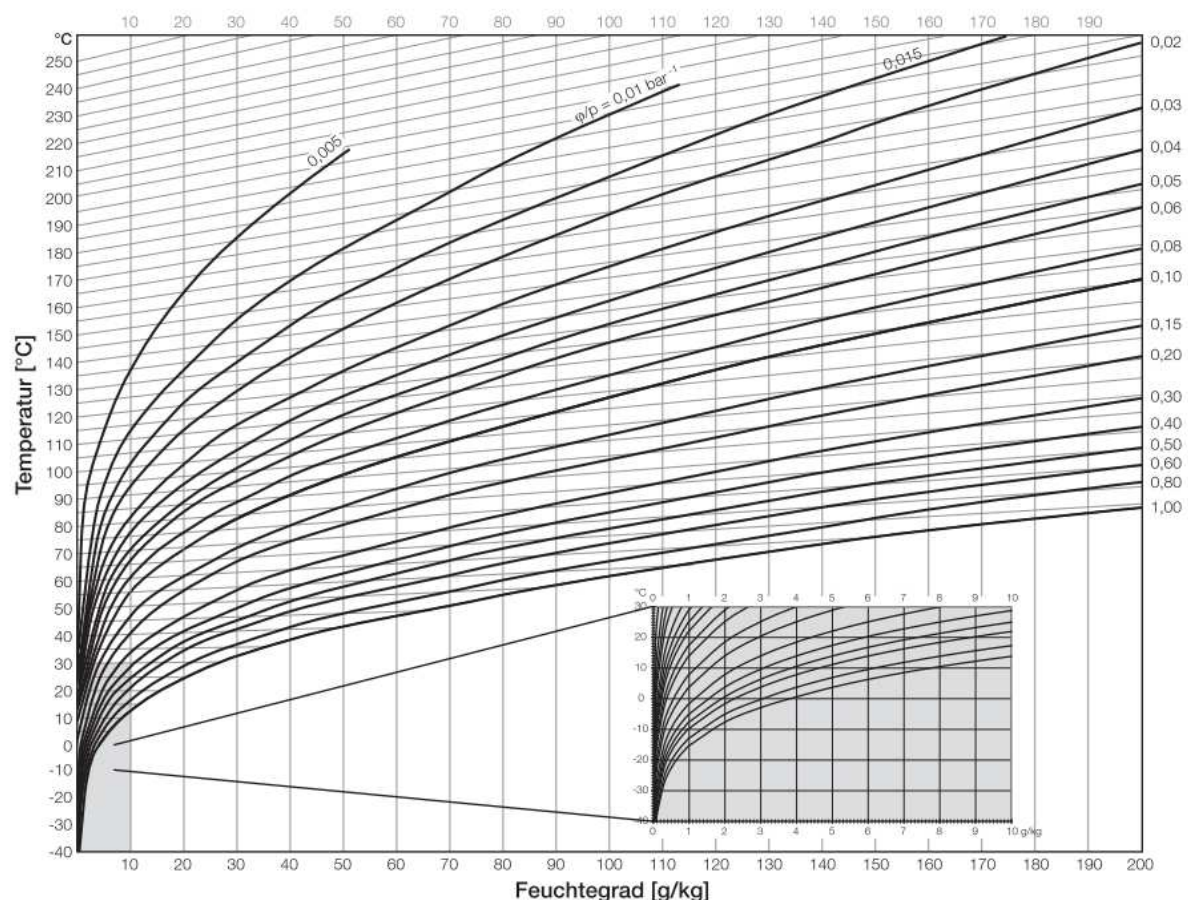
Der Partialdruck lässt sich entweder durch Umstellen von Gleichung (6) mit Gleichung (9) berechnen



$$p_d = \varphi \cdot p_s \quad (9)$$

oder bei der Annahme der Gasgemischkomponenten als ideale Gase, durch Umstellen der Idealen Gasgleichung, durch Gleichung (10). [29] [31]

$$p_d = \varphi \cdot R \cdot T \quad (10)$$

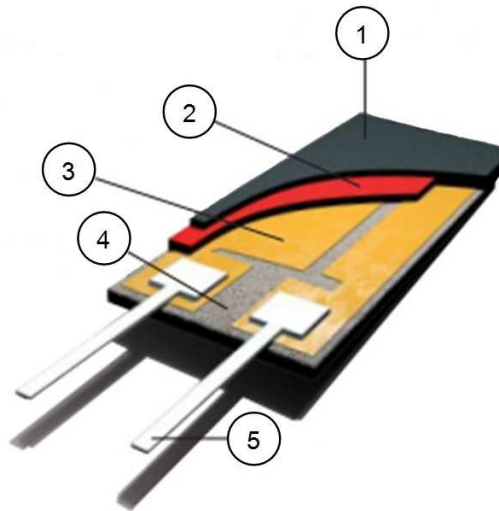


**Abbildung 17:** Wassergehalt in Luft, abhängig von Temperatur und Druck [30]

Das oben erwähnte Verfahren der Taupunktmessung durch ein Taupunktspiegelhygrometer ist zwar das genaueste aber auch das teuerste Verfahren. Die entsprechenden Messinstrumente sind sehr kostenintensiv in der Anschaffung und bedürfen einer sehr aufwendigen Wartung. [29]

Eine Alternative besteht in einem kapazitiven Feuchtesensor auf Polymerbasis. Wie in **Abbildung 18** gezeigt, besteht der Sensor aus 2 Elektroden, die durch ein Dielektrikum getrennt werden. Das verwendete Dielektrikum auf Polymerbasis verändert seinen Dielektrizitätswert in Abhängigkeit von der absorbierten Feuchte im Polymer

und ist damit abhängig von der relativen Feuchte der umströmenden Luft. Zwar müssen auch hier genaue Werte für Druck und Temperatur vorliegen, aber der Sensor an sich besitzt eine deutlich höhere Genauigkeit und kann mit bis zu 300 bar Überdruck beaufschlagt werden. Die kompakte Bauform macht eine Integration in den Prozess deutlich einfacher. [29]



**Abbildung 18:** Aufbau Feuchte-Polymer-Sensor; 1 feuchtedurchlässige Elektrode, 2 dielektrisches Polymer, 3 untere Elektrode, 4 Träger aus Keramiksubstrat, 5 Anschlüsse [30]



### 3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Die beim WIG-Schweißen von CrNi-Stahlrohren auftretenden Unregelmäßigkeiten auf Winterbaustellen können aufgrund der Seltenheit dieser Baustellenbedingungen nicht direkt untersucht werden. Für die Analyse der Ursachen müssen deswegen die relevanten Umgebungsbedingungen zusammengetragen und bewertet werden.

Aus der Literaturrecherche ist zu schlussfolgern, dass insbesondere die Feuchteansammlung in den jeweiligen Bauteilen sowie die damit verbundenen Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas für das Auftreten der Anlauffarben ausschlaggebend sind. Der erste Schritt der Untersuchung besteht in einem Schweißversuch unter kontrollierten Bedingungen. Damit die Umgebungsbedingungen Temperatur und Feuchte konstant gehalten werden können, erfolgt die Versuchsdurchführung in einer Klimakammer. Unter diesen Versuchsbedingungen sollen außerdem die Auswirkungen von Temperaturänderungen auf den Prozess und die verwendeten Geräte untersucht werden.

Das Ziel ist dabei die Festlegung eines Grenzwertes für ein anlauffarbenfreies Schweißen von CrNi-Stahl hinsichtlich der Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas. Dafür wird das Wurzelschutzgas gezielt mit Feuchtigkeit angereichert und für die Schweißung von Proben verwendet. Von einem beliebigen hohen Startwert ausgehend, wird dann die Feuchtekonzentration stufenweise gesenkt, bis die zerstörend geprüften Probestücke anlauffarbenfrei sind. Die Ergebnisse werden außerdem für die Erstellung einer Farbskala genutzt. Ausgehend von den Ergebnissen der Analyse der Schweißbedingungen auf Winterbaustellen sowie den Ergebnissen der Versuche, sind nach Möglichkeit weitere Maßnahmen zu erstellen, um Unregelmäßigkeiten unter diesen Bedingungen mit noch größerer Sicherheit zu vermeiden. Die für die Ausführung der Maßnahme benötigten Geräte und Materialien sind in ihrem Leistungsspektrum zu beschreiben und auszuwählen.

Um die Eignung des Ar/He/H<sub>2</sub> als Prozessgas zur Steigerung der Schweißgeschwindigkeit zu untersuchen, wird das Gasgemisch in seiner Wirkung mit dem Standardprozessgas Argon sowie dem Gasgemisch Argon/Helium verglichen. Die Versuche dienen vor allem dem Abstecken der erreichbaren Leistungsgrenzen bei der Vorschubgeschwindigkeit. Dabei werden Probenpaare mit gleichem Durchmesser und Länge angefertigt und mit dem gepulsten WIG-Orbital-schweißverfahren gefügt. Für die einzelnen Prozessgase werden die Vorschubgeschwindigkeit und die Stromstärke variiert.

## 4 Analyse von Baustellenbedingungen und Maßnahmen auf Winterbaustellen

### 4.1 Beschreibung der Bedingungen

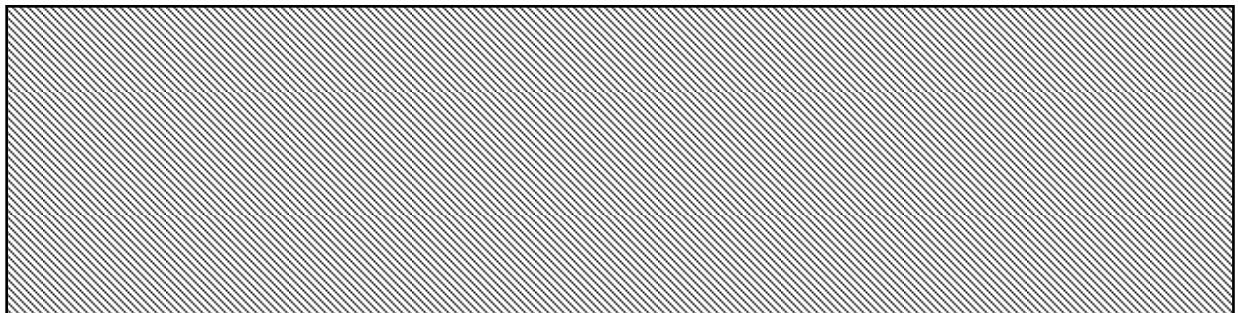
Grundvoraussetzung für das Erreichen hoher Schweißnahtqualitäten bei diesem Verfahren ist die Einhaltung verschärfter Sauberkeitsvorschriften im Bezug auf die Schweißnahtvorbereitung und die direkte Schweißumgebung. Die Vorbereitung der Fügestellen muss mit einer hohen Genauigkeit erfolgen, da ohne Zusatzmaterial geschweißt wird und eine mangelhafte Nahtvorbereitung direkt zu Unregelmäßigkeiten der Schweißnaht führt. Die alltäglichen Zustände auf Baustellen laufen diesen Anforderungen in den meisten Fällen zuwider, was einen erhöhten Aufwand für das zuständige Schweißpersonal bedeutet.

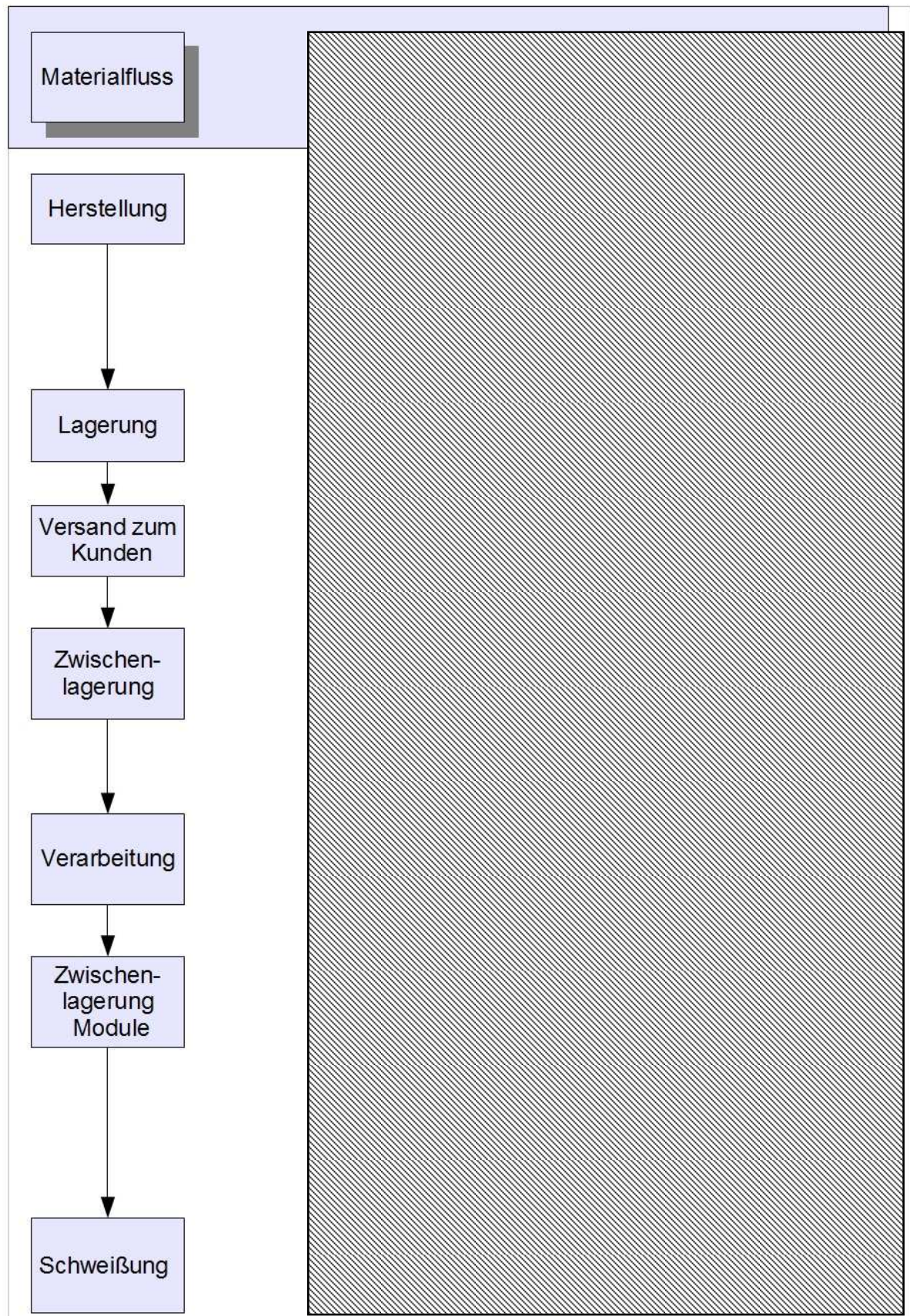
Der Aufbau eines Verteilungsnetzes für die Halbleiter- und Pharmaindustrie ist im Anhang abgebildet. (Anlage 5)

Die Verlegung der Rohrleitungen erfolgt teilweise im Außenbereich. Es müssen demnach die Umwelteinflüsse Wind, Niederschlag und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt betrachtet werden. Die Gerätetechnik, insbesondere die Schweißtechnik, kann dadurch negativ beeinflusst werden. Unter diesen Bedingungen kann es zu einer verstärkten Feuchteansammlung in den metallischen Bauteilen und Modulen, wie Rohrabschnitte und Verteilerpunkte, kommen.

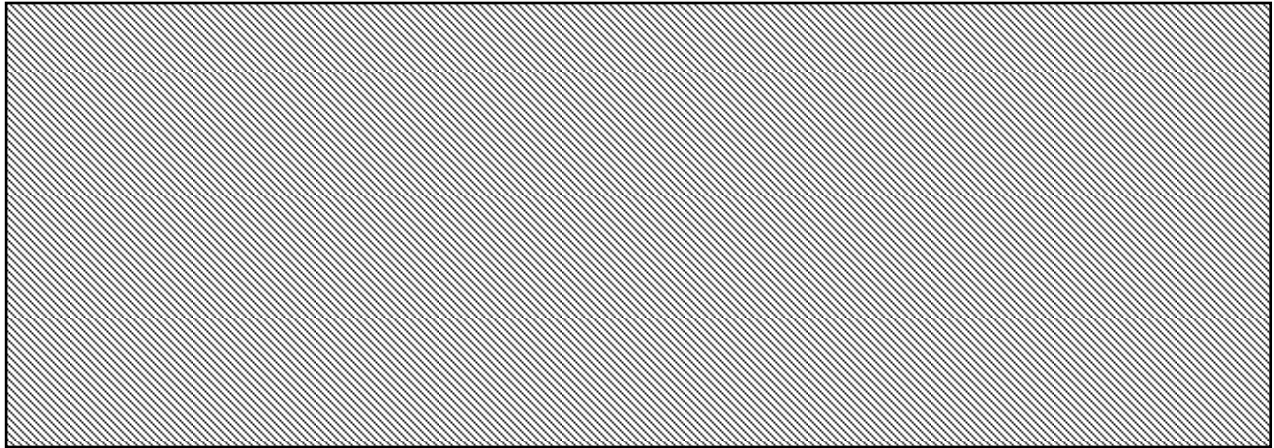
Die anfallenden Schweißarbeiten werden soweit wie möglich im Werkstattbereich fertiggestellt. Der Anschluss dieser Module oder Rohrleitungsabschnitte muss aber zwangsläufig im Freien an den jeweiligen vorgelagerten Streckenabschnitten erfolgen. Der Materialfluss einschließlich der durchzuführenden Schutzmaßnahmen ist in **Abbildung 19** zu sehen. Die gezeigten lieferanten- und verarbeitungsseitigen Schutzmaßnahmen sind sowohl auf den Sommerbaustellen (Vorwärmen entfällt) als auch auf den meisten Winterbaustellen ausreichend.

Um den gewünschten Trocknungseffekt zu erreichen, werden in der Regel bis zu 6 m Rohr vor der Fügestelle vorgewärmt. Hierbei kommen Heizstrahler zum Einsatz. Die





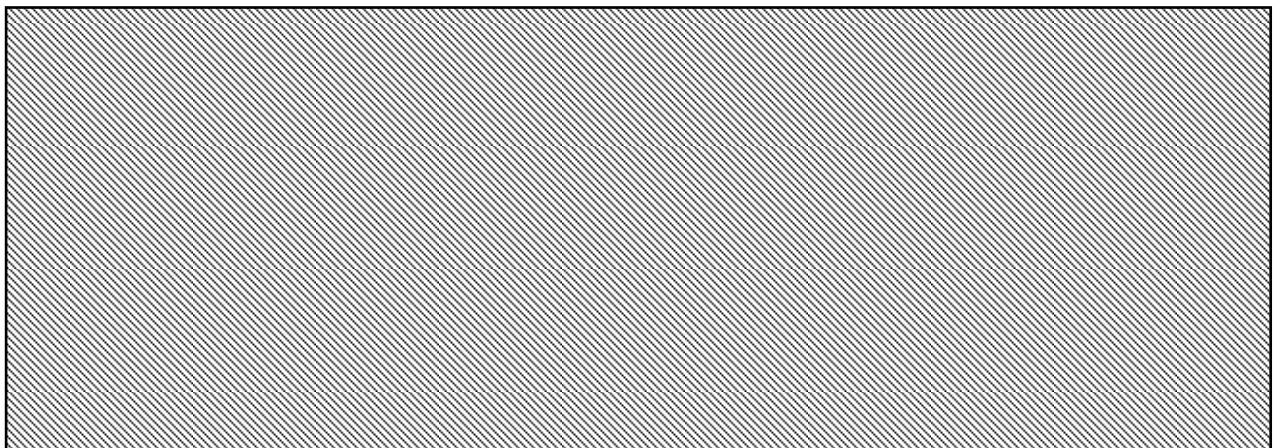
**Abbildung 19:** Reduzierung der Schutzstufen im Laufe des Fertigungsprozesses



## 4.2 Beschreibung der Unregelmäßigkeiten

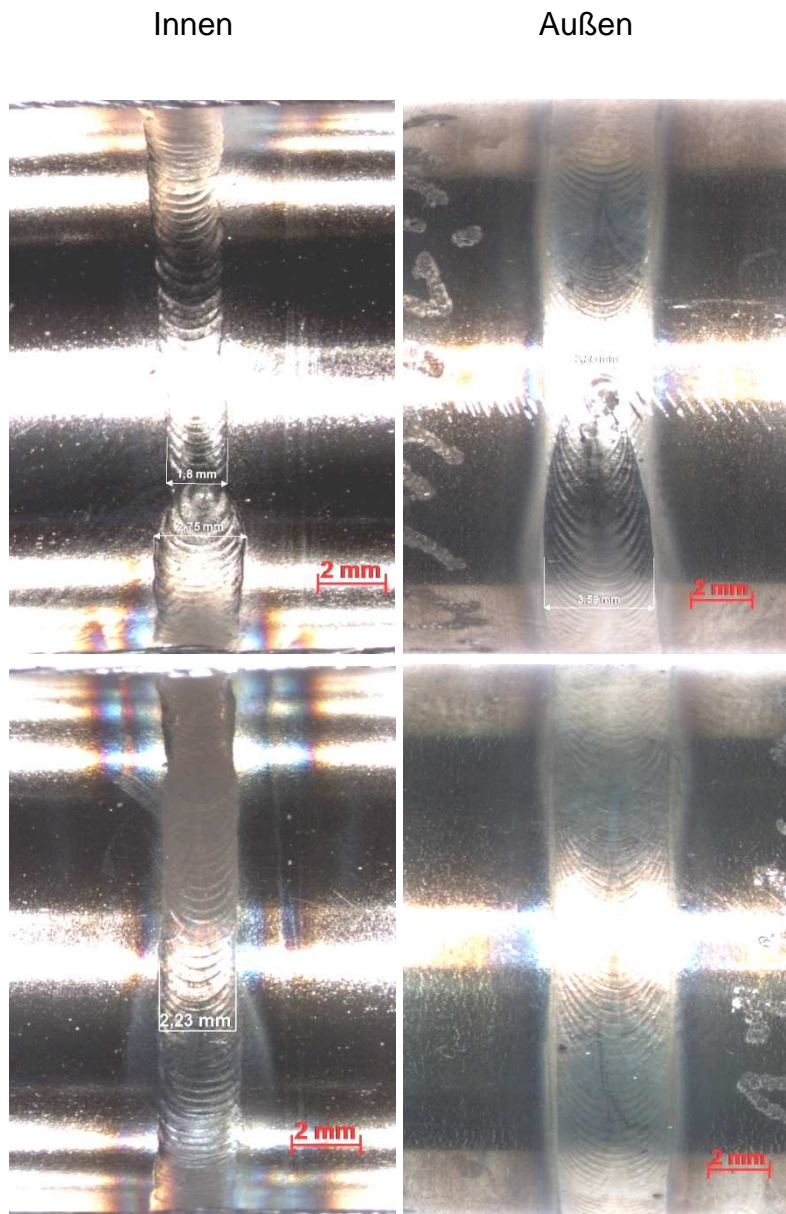
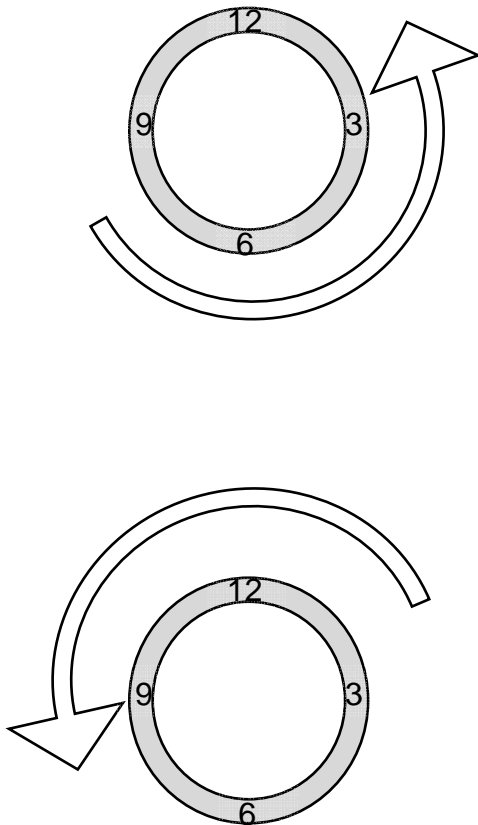
Die am häufigsten auftretenden Unregelmäßigkeiten sind Anlauffarben im Rohrinne-  
ren. Ebenfalls häufig sind Schweißnahtmittlenabweichungen im Schweißnahtverlauf.  
Die Ausprägung der Anlauffarben scheint dabei vom Rohrdurchmesser abhängig zu  
sein. So bilden sich bei kleineren Rohrdurchmessern im Rohrinne-  
ren meist komplett  
umlaufende Anlauffarben aus. In größeren Rohren, ab 3“ aufwärts, treten die Anlauf-  
farben häufig partiell im oberen Bereich auf. Die in **Abbildung 20** gezeigte Unregel-  
mäßigkeiten entstanden zufällig bei Schweißversuchen während der Vorversuchs-  
phase und sollen zur Veranschaulichung dienen.

Die Schweißung beginnt in der Darstellung etwa auf 8 Uhr und läuft gegen den Uhr-  
zeigersinn. Die untere Halbschale ist dabei fast vollkommen frei von Anlauffarben. Ab  
3 Uhr beginnt in der oberen Halbschale die Unregelmäßigkeit. Eine logische Erklä-  
rung für diese Erscheinung ist eine unzureichende Wurzelschutzgasabdeckung. Weil  
der untere Bereich weitestgehend anlauffarbenfrei ist, kann von einer funktionieren-  
den Gasversorgung ausgegangen werden. Da besonders bei größeren Rohrdurch-  
messern meist eine Wurzelschutzgaskammer eingesetzt und der Sauerstoffgehalt im  
Wurzelschutzgas gemessen wird, ist die Ursache für die ungenügende Gasabde-  
ckung jedoch fraglich.

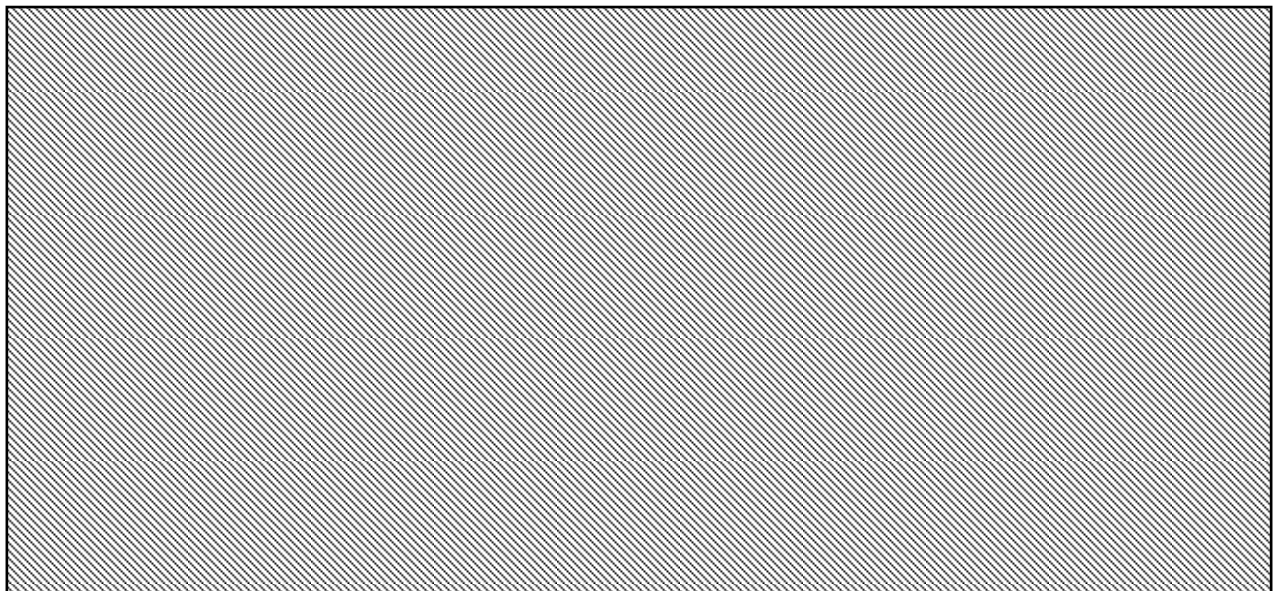




Position des Rohraus-  
schnittes während der  
Schweißung



**Abbildung 20:** Schweißnahtunregelmäßigkeit: partielle Anlauffarben im oberen Bereich



### 4.3 Bewertung der etablierten Maßnahmen

Aus den bisher genannten Rahmenbedingungen lassen sich bereits die ersten Schwierigkeiten und mögliche Fehlerquellen ableiten.

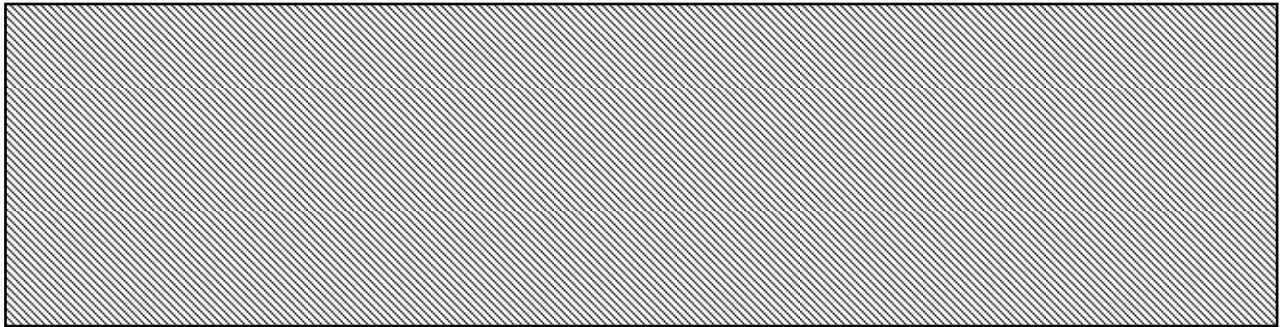
Der Effekt der Kondenswasserbildung bei der Umlagerung von Bauteilen in verschiedenen Temperaturbereichen ist aus anderen korrosionsbeständige Stähle bearbeitenden Industriezweigen bekannt. Allerdings sind die Anforderungen bezüglich Anlauffarben meist deutlich geringer als bei Schweißarbeiten im Bereich der Chip- oder Pharmaindustrie. Auch werden normalerweise, aufgrund unzureichender Lagerbedingungen, kalte Bauteile in eine deutlich wärmere Werkstattumgebung eingebracht. Bei einer ausreichenden Akklimatisierungszeit, dem Annähern der Werkstücktemperatur an die Umgebungstemperatur, verdunstet das Kondensat auf der Bauteiloberfläche wieder. Da die Akklimatisierung, abhängig von der Bauteilgröße, mehrere Stunden bis Tage dauern kann, kommt diese Vorgehensweise nur selten in Frage. Eine deutliche Beschleunigung des Vorganges bewirken Heizstrahler und Heißluftgebläse. Diese Maßnahmen sind unter gewöhnlichen Umständen auch bei dem Bau von Rohrleitungen wirkungsvoll. Ist die Rohrleitung allerdings länger als die auf Trockentemperatur gebrachte Teilstrecke, trocknet der vorgelagerte Bereich deutlich langsamer. Die Folge ist ein unzulässiger Feuchtigkeitsgehalt des Wurzelschutzgases.

Beim Umlagern der Rohrsegmente aus dem Werkstattbereich in den Außenbereich kommt es nicht zur Kondensation auf der Rohroberfläche. Das Problem bildet in diesem Fall aber die im Rohr eingeschlossene Luft, da die vorgefertigten Rohrsegmente an den Heftstellen mit Kleband und an den Enden mit Kunststoffkappen verschlossen werden. Beim Abkühlen der Luft im Inneren der Rohrsegmente kommt es zu einer Übersättigung des enthaltenen Gasgemisches. Das Ergebnis ist ebenfalls ein Auskondensieren des überflüssigen Wassers. Erschwerend kommt bei längerer Lagerungszeit der Temperaturwechsel zwischen Tag und Nacht und im Verlauf der Jahreszeiten hinzu. Über Nacht kann das überschüssige Wasser ausfrieren. Durch die größere Trägheit und dem damit einhergehenden Partialdruckgradienten zwischen dem Wasser-Rohr System sowie der Umgebungsluft, kommt es zu einer verstärkten Diffusion von Wassermolekülen in das Rohrinne. Dies ist möglich, da die in der Werkstatt vorgefertigten Module und Rohrsegmente nur durch Kunststoffelemente abgedichtet sind. Bei längeren Lagerzeiten und häufigen starken Temperaturschwankungen ist demnach eine Anreicherung von Wasser bzw. Eis im Rohr unter bestimmten Voraussetzungen denkbar. Diese Überlegung deckt sich auch mit den Erfahrungsberichten von Winterbaustellen. So kommt es in einigen Fällen vor, dass ein Wasserrinnsal nach dem Vorwärmen auf Trocknungstemperatur aus dem Rohr läuft. Das während der Lagerzeit auskondensierte und an der Rohrwand festgefrorene Wasser kann unter Umständen in großen Mengen auftreten.



Das Vorwärmen des Fügebereichs auf 15-30 °C bewirkt eine günstige Abkühlgeschwindigkeit, die innerhalb der schweißtechnischen Erfahrungswerte liegt.

Durch die Erhöhung der Wurzelschutzgastemperatur steigt auch der Sättigungsdampfdruck. Das Wurzelschutzgas kann dadurch mehr Feuchte abtransportieren. Gleichzeitig wird der Partialdruckgradient zwischen Oberflächenwasserschicht und wandnahen Strömungsbereichen erhöht und erleichtert so zusätzlich die Verdunstung, was die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht.



Die beschriebenen Probleme sind, bis auf die Feuchte in langen Rohrleitungen, mit den etablierten Maßnahmen sicher zu handhaben. Die Feuchte stellt deshalb ein besonderes Problem dar, weil die Auswirkungen von verschiedenen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas weder in der Referenzliteratur noch in der Sekundärliteratur behandelt werden. Anders als bei der zulässigen Sauerstoffkonzentration konnte für die Feuchte keine Angabe über Grenzwerte für anlauffarbenfreies Schweißen gefunden werden. Dieser Umstand ist sicherlich dem Seltenheitswert dieser Problemstellung zuzuschreiben. Auch sind am Markt keine kostengünstigen Messgeräte mit ausreichend großem Messbereich und Genauigkeit verfügbar.

## 5 Versuchsplanung und Durchführung

- **Feuchte**

Aus den aufgezeigten Randbedingungen auf Winterbaustellen ergibt sich ein Hauptansatzpunkt für die Untersuchung hinsichtlich der Ursache der Anlauffarben.

Dass Feuchte neben Sauerstoff und CO<sub>2</sub> ebenfalls zu Anlauffarben führen kann, ist aus der Literaturrecherche bekannt. Es ist allerdings zu klären, ob die durch Feuchte verursachten Anlauffarben das gleiche Erscheinungsbild aufweisen wie sauerstoffinduzierte Anlauffarben.

Unabhängig von dem Erscheinungsbild sollte es möglich sein, auch für die Feuchte einen Grenzwert für anlauffarbenfreies Schweißen festzulegen.

Neben dem Erscheinungsbild und dem Grenzwert muss die Fragestellung behandelt werden, warum es auf Winterbaustellen entweder zu einer stärkeren Feuchteansammlung in den Bauteilen und Rohrsegmenten kommt oder ob die vorhandene Feuchte bei Minusgraden eher zu Unregelmäßigkeiten im Schweißprozess führt.

- **Gasgemische**

Für das Prozessgas Ar/He/H<sub>2</sub> soll die Anwendbarkeit im Dünnblechbereich im Zusammenhang mit dem gepulsten WIG-Orbitalschweißen mit geschlossenen Köpfen (Schweißzangen) ohne Zusatzmaterial untersucht werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt in der maximal erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit durch die Zumischung von 70 % He und 10 % H<sub>2</sub> im Vergleich zu reinem Ar und Ar/He 70/30. Zur besseren Vergleichbarkeit werden Parallelversuche mit den Gasgemischen Ar/He und reinem Ar durchgeführt.

### 5.1 Experimentelle Randbedingungen

Die für die geplanten Versuche benötigten Geräte, Messmittel, Materialien und Software sollen im Folgenden vorgestellt werden. Die für die Versuche relevanten Eigenschaften und Funktionsweisen werden besonders hervorgehoben.

#### 5.1.1 Geräte, Messmittel und Software

- **Schweißstromquelle für das gepulste WIG-Orbitalschweißen**

Die für die Versuche zu verwendende Stromquelle ist die ARC M307 der Firma AMI ARC Machines, INC. In der **Abbildung 22** ist die Stromquelle ohne und mit Kühleinheit abgebildet.



**Abbildung 22:** Schweißstromquelle ARC M307 (links) ARC M307 mit Kühleinheit (rechts) [43]

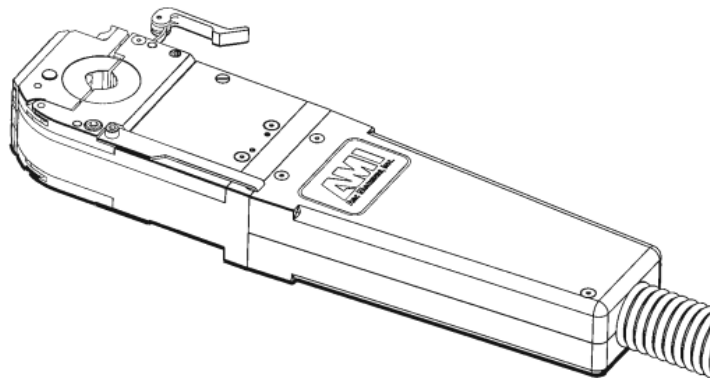
Die Tabelle 5 zeigt die aus dem Datenblatt zur Anlage ersichtlichen schweißtech-  
nisch relevanten Werte.

**Tabelle 5:** ARC M307 Technische Daten

Eigenschaft	Beschreibung
Schweißverfahren	Wolfram-Inert-Gas WIG
Lichtbogenzündung	HF-Impuls- bzw. Berührungszündung
während des Prozesses einstellbare Parameter	Stromstärke, Brennerumlauf, Drahtzufuhr und Pulsfrequenz +- 100 %
Netzeingangsspannung	115-240 V Wechselstrom, ±10 %, einphasig, 50/60 Hz (Automatische Umschaltung)
Ausgangsleistung/ Schweißstrom	3 bis 200 A Gleichstrom
Einschaltdauer	100 % bei 150 A
Speicherkapazität für Schweißprogramme	20 GB
Speichermedium	Integrierte Festplatte; USB-Anschluss
Einstellbare Parameter im Schweißprogramm	Hochstrom- /Grundstromstärke und -pulszeiten, Brenner- umlaufgeschwindigkeit bei Hoch- und Grundstrom; Brennerumlauf (kontinuierlich, Schrittlauf, aus); Drahtvorschub (kontinuierlich, Schrittlauf, aus)
Abmessungen	Höhe: 40 cm; Breite: 29 cm; Länge: 64 cm
Gewicht	28 kg

- **Schweißbrenner für das gepulste WIG-Orbitalschweißen**

Für den überwiegenden Teil der Versuche kommt die Standardausführung des Schweißkopfes ARC M9-750 zum Einsatz. Der in **Abbildung 23** aufgeführte Schweißkopf wird mit 3/4" Spannbacken ausgerüstet und kann so zum Verschweißen der 3/4" Rohre verwendet werden.



**Abbildung 23:** ARC M9-750 Schweißkopf [45]

Für die Arbeiten mit den Rohrdurchmessern 1" und 4" werden ähnliche an die jeweilige Rohrgröße angepasste Schweißköpfe verwendet

1"-> ARC M9-1500

4"-> ARC M8-4000

- **Klimakammer**

Für die geplante Simulation der Temperatur und Feuchte auf Winterbaustellen wird der in **Abbildung 24** gezeigte Klimaprüfschrank WK 11 - 600/40 der Firma Weiss Umwelttechnik GmbH verwendet. Durch die Öffnungen in der linken Seitenwand kann die benötigte Leitung für das Wurzelschutzgas und das Schlauchpaket ins Innere der Klimakammer eingebracht werden. Weitere relevante Daten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.



**Abbildung 24:** Klimaprüfschrank WK 11 - 600/40 [44]

**Tabelle 6:** Klimaprüfschrank WK 11 - 600/40 Technische Daten

Eigenschaft	Beschreibung
Prüfrauminhalt	600 l
max. Beladung	160 kg
Temperaturbereich	von -40 °C bis +180 °C
Klimabereich	Temperatur 10 bis 95 °C rel. Feuchte 10 bis 98 %
Aufheizgeschwindigkeit	4,0 K/min
Abkühlgeschwindigkeit	3,0 K/min
Programmspeicher	für 100 Programme
Simulation von Umwelteinflüssen	Ultra-Vitalux-Strahlungseinrichtung Wasser-Berieselungseinrichtung
Einsatzgebiete	DIN - gerechte Klimaprüfungen

- **Temperaturmessgerät**

Zur Messung der Temperaturgrößen dienen:

- Messgerät mit Thermoelementen

Thermologger 309 von VOLT CRAFT mit zwei Thermoelementen des Typs K mit einem Temperaturbereich -50 bis 200 °C. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7:** Thermologger 309 technische Daten

Eigenschaft	Beschreibung
Temperaturbereich	von -200 °C bis +1370 °C
Arbeitstemperatur	0 bis 50 °C
relative Luftfeuchte	0 bis 80 %, nicht kondensierend
Temperatur für garantierte Genauigkeit	23 °C ±5 K
Messtoleranz Gerät	Messbereich Messgerät: -200 °C bis +200 °C; Genauigkeit: ±(0,2 % +1 K); Auflösung: 0,1 °C
Messtoleranz Sensor	-50 °C bis +200 °C ±2,2 K

- Wetterstation mit Thermoelement

Die Wetterstation verfügt über ein Thermoelement mit Sender im Außenbereich und ein Thermoelement im Anzeigegerät für die Raumtemperatur. Die Genauigkeit ist mit ±1 K angegeben.

- Analoges Thermometer

Das Thermometer verfügt über einen Messbereich von -25 °C bis 45 °C. Die Genauigkeit wird mit ±(0,5 K +1 K) angenommen.

- **Sauerstoffmessgerät**

Für die Sauerstoffmessung wird der AERO2-MAT 4115-B verwendet. Bei dem in **Abbildung 25** gezeigten Gerät wird die Kalibrierung anhand des Sauerstoffgehaltes der umgebenden Luft durchgeführt. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich eine ausreichend genaue Messung realisieren. Die Genauigkeit wird vom Hersteller mit ±0,2 % für die Messunsicherheit und ±1 % für den angezeigten Wert bzw. Wiederholungsgenauigkeit angegeben. Der Messbereich liegt bei 1000 ppm = 100 % bis 1 ppm. Das Messen des Grenzwerts von 30 ppm für Anlauffarben, die durch reinen Sauerstoff verursacht werden, kann somit sicher gewährleistet werden. Das Gerät ist mit einer integrierten Pumpe zum Ansaugen des Messgases ausgestattet. Im Zuleitungsschlauch ist außerdem noch ein Partikelfilter eingebaut. Nach einer Aufwärmphase von ca. 10 min (Angabe des Herstellers) kann das Gerät an der Umgebungsluft kalibriert werden. Aufgrund der Länge des Zuleitungsschlauches hat das Gerät eine Reaktionszeit von etwa einer halben Minute.





**Abbildung 25:** AERO2\_MAT 4115 mit Zuleitung und Partikelfilter [46]

- **Feuchtemessgerät**

Unter den Bedingungen der durchzuführenden Versuche und des zu erwartenden Messbereichs erweist sich ein Drucktaupunktsensor (die Vor- und Nachteile der einzelnen Messmittel werden in Kapitel 2.4 näher erläutert) als geeignet. Verwendet wird das in **Abbildung 26** gezeigte PM 880 AC Panametrics Portable Hygrometer mit dem in **Abbildung 27** dargestellten Drucktaupunktsensor MSI Probe.

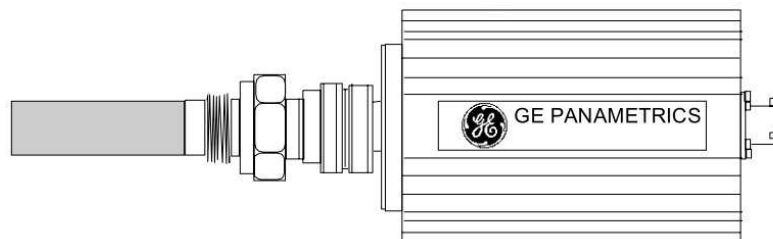
Die relevanten technischen Daten sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Auf die Eignung des verwendeten Sensors für Prozesstemperaturen unter dem Gefrierpunkt wird im Gegensatz zu anderen Herstellern baugleicher Modelle nicht eingegangen. Dieser Einsatzbereich wird allerdings auch nicht explizit ausgeschlossen. In Anlehnung an die Angaben des Herstellers TESTO [30] wird für die Messungen bei Prozessgastemperaturen unter 0 °C von einer Messunsicherheit  $\geq 4$  ausgegangen.

Für einen Teil der Berechnungen im Zusammenhang mit Feuchte wird die Software der Firma VAISALA verwendet. Das Rechenprogramm erlaubt die Eingabe der wichtigsten Umgebungsparameter mit verschiedenen Einheiten und für verschiedene Gase. So ist beispielsweise neben Luft auch Argon direkt als Gasart hinterlegt.



**Abbildung 26:** Restfeuchtemessgerät mit Drucktaupunktsensor PM 880 [47]



**Abbildung 27:** MSI Probe Drucktaupunktsensor von GE Panametrics [47]

**Tabelle 8:** PM880 technische Daten

Eigenschaft	Beschreibung
Tau/Frostpunkt Temperatur	von -110 °C bis +60 °C
Druck	$\leq 345$ bar
Arbeitstemperatur	Temperatur -10 bis 50 °C
relative Luftfeuchte	0 bis 80 %, nicht kondensierend
Messtoleranz Gerät	Messbereich Messgerät: -65 °C bis +60 °C; Genauigkeit: $\pm 2$ °C <sub>tg</sub> ( $\pm 4$ °C <sub>tg</sub> bei Messungen unter dem Gefrierpunkt)
Wiederholgenauigkeit Gerät	$\pm 0,5$ °C <sub>tp</sub>
Messtoleranz Sensor	-110 °C <sub>tp</sub> bis +70 °C <sub>tp</sub>
Arbeitstemperatur Sensor	Die Arbeitstemperatur des Sensors muss min. 10 °C über dem gemessenen Taupunkt liegen, da es sonst zu Kondensation und dadurch zu Messfehlern kommen kann.
Strömungsgeschwindigkeit Gas	bis 100 m/s

### 5.1.2 Versuchswerkstoffe und Materialien

- **Probenwerkstoff:**

Als Probenmaterial wird der Werkstoff X2CrNiMo17-12-2 (Werkstoffnummer 1.4404) verwendet, die Bezeichnung nach AISI lautet 316L.

Der Anwendungsbereich dieses metastabilen austenitischen, korrosionsbeständigen Stahls liegt bei Komponenten von Maschinen und Rohrleitungssystemen mit erhöhten Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit, besonders in chlorhaltigen Medien. Der X2CrNiMo17-12-2 wird dabei in verschiedenen Bereichen der pharmazeutischen Industrie sowie der Medizin- und Zahntechnik verwendet. Ebenfalls wird er für die Fertigung der Versorgungsleitung für Reinstmedien in der Halbleiter- und Chipindustrie verwendet. [48] [49]

- **Materialien für Zuleitung und Verschraubung:**

Für die Verbindung der einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus werden die folgenden Materialien verwendet:

- Spülschläuche aus Perfluoralkoxylalkan (PFA) 1/4" und Kapillarrohr aus X2CrNiMo17-12-2 1/8"
- Swagelok Rohrverschraubung aus 316L (X2CrNiMo17-12-2)
- Ventile aus 316L (X2CrNiMo17-12-2)

- **Prozessgase**

Bei den Restfeuchteversuchen und bei den Einschweißversuchen kommt Argon der Reinheit 5.0 (99,999 %) zum Einsatz. Die hohe Reinheit des Ausgangsgases ( $\leq 3$  ppm Feuchte) verbessert die Aussagefähigkeit der Versuche im Allgemeinen. Speziell bei den Restfeuchteversuchen kann von einer Verbesserung der Messbedingungen ausgegangen werden. Die für die verschiedenen Versuche verwendeten Gase und Gasgemische sind in Tabelle 9 aufgelistet.

**Tabelle 9:** Verwendete Gase und Gasgemische [21]

Versuchsreihe	Hauptgas	Zusatzkomponente	Reinheit	Wirkung
Restfeuchteversuche	Argon 5.0	-	5.0	inert
Schweißversuche mit reinem Argon	Argon 5.0	-	5.0	inert
Schweißversuche mit Ar/He Mischgas	Argon	Helium 30 %	Ar 4.8; He 4.6	inert, höhere Ionisierungsenergie, höhere Wärmeleitfähigkeit
Schweißversuche mit Ar/He/H <sub>2</sub> Mischgas	Helium	Argon 20 %, Wasserstoff 10 %	5.0 (alle)	Ionisierungsenergie, sehr hohe Wärmeleitfähigkeit

### 5.1.3 Schweißparameter

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten, wird, soweit nicht anders angegeben, mit einem Grundparametersatz gearbeitet. Dieser beruht auf der Empfehlung des internen Berechnungsprogrammes der Schweißmaschine. Die ausgegebenen Schweißprogramme werden anhand von Erfahrungswerten und den speziellen Anforderungen vor Ort vom Anlagenbediener angepasst.

Für die Versuche mit den Gasgemischen werden die Vorschubgeschwindigkeit, die Pulsdauer und die Stromstärkeanpassung der einzelnen Sektoren variiert. Eine komplette Übersicht der einstellbaren Parameter befindet sich im Anhang (Anlage 6). Die verwendeten Parameter, mit den Zuordnungen zu den jeweiligen Sektoren, sind in Tabelle 11 aufgeführt. Die Werte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den in Tabelle 10 und **Abbildung 3** angegebenen Richtwerten.

Das Verhältnis zwischen Grundstrom- und Hochstromzeit sowie die Pulsdauer hängt dabei von der Schweißgeschwindigkeit und der Wanddicke des Rohres ab. Bei einer im Orbitalverfahren üblichen Schweißgeschwindigkeit von 8 bis 15 cm/min gilt als Richtwert jeweils 1/10 der Wanddicke für Hochstrom- und Grundstromphase in Sekunden.

Das Verhältnis der Höhe von Grundstrom- und Hochstromstärke richtet sich nach Werkstoff und Wanddicke. Bei austenitischen CrNi-Stählen wird eine Stromstärke von 40 A pro Millimeter Wandstärke als Ausgangswert verwendet. [1][4][50]

Bei der Auswahl der Parameter ist auch die verwendete Anlagentechnik ein wichtiger Faktor. So sind die verwendeten Orbitalschweißköpfe aufgrund ihrer kompakten Bauweise anfällig für Überhitzung. Ein zu großer Hochstrom und lange Pulszeiten

sollten demnach vermieden werden, um eine größere Vorschubgeschwindigkeit zu erreichen,.

**Tabelle 10:** Anhaltswerte für die Einstellung der Grundstromstärke beim Orbitalschweißen mit gepulstem Gleichstrom [4]

Wanddicke in mm	Grundstromstärke im Verhältnis zur Hochstromstärke bei	
	ferritischen Stählen in %	austenitischen Stählen in %
1,0...1,5	30	35
1,5...2,0	35	40
2,0...3,0	35	50
über 3	35...40	60

**Tabelle 11:** Übersicht der Hauptparameter des verwendeten Schweißprogramms

Sektor	Hochstrom in A	Grundstrom in A	Pulsdauer Hoch- strom/Grundstrom in s	Vorschub- geschwindigkeit in cm/min
1	65	25	0,1/0,1	12
2	65	25	0,1/0,1	12
3	64	25	0,1/0,1	12
4	63	25	0,1/0,1	12
5	63	25	0,1/0,1	12
6	60	25	0,1/0,1	12

#### 5.1.4 Auswertungsmethoden

- **Rasterelektronenstrahlmikroskop**

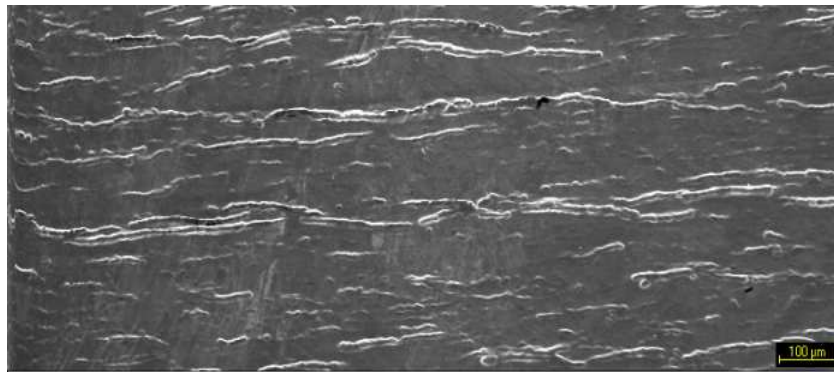
Die Vorteile des Rasterelektronenstrahlmikroskops liegen in der lichtunabhängigen Darstellung des betrachteten Objekts. Mit der Methode der Energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX) kann zusätzlich zum Abbild der Oberfläche auch eine Analyse der Elemente an der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich durchgeführt werden. [51][52]

Das Ergebnis eines Punktskans ist im Anhang abgebildet (Anlage 7).

Werden mehrere Punkte entlang einer Linie aufgenommen, wird von einem Linien-scan gesprochen. Mit dieser Methode können Änderungen der im oberflächennahen Bereich auftretenden Elemente sehr gut detektiert werden

Die Auswertung eines EDX-Linienscans ist im Anhang abgebildet (Anlage 8). Für den Scan wird die Oberfläche einer unbehandelten Probe aus CrNi-Stahl genutzt.

Die verwendete Oberfläche ist in **Abbildung 28** dargestellt. Gut zu sehen sind die fertigungsbedingten Riefen in der Oberfläche. Das Ergebnis der Analyse wird in Tabelle 12 mit den Angaben aus dem Werkszeugnis (Anlage 1) verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung, deutliche Abweichungen können bei den folgenden Versuchen demnach als Zu- oder Ablegierung des Grundmaterials bzw. als aufgetragene Schichten eingeschätzt werden.



**Abbildung 28:** Rasterelektronenstrahlmikroskopaufnahme der Oberfläche eines CrNi-Stahlrohres

**Tabelle 12:** Ergebnisse einer EDX-Punktanalyse eines X2CrNiMo17-12-2

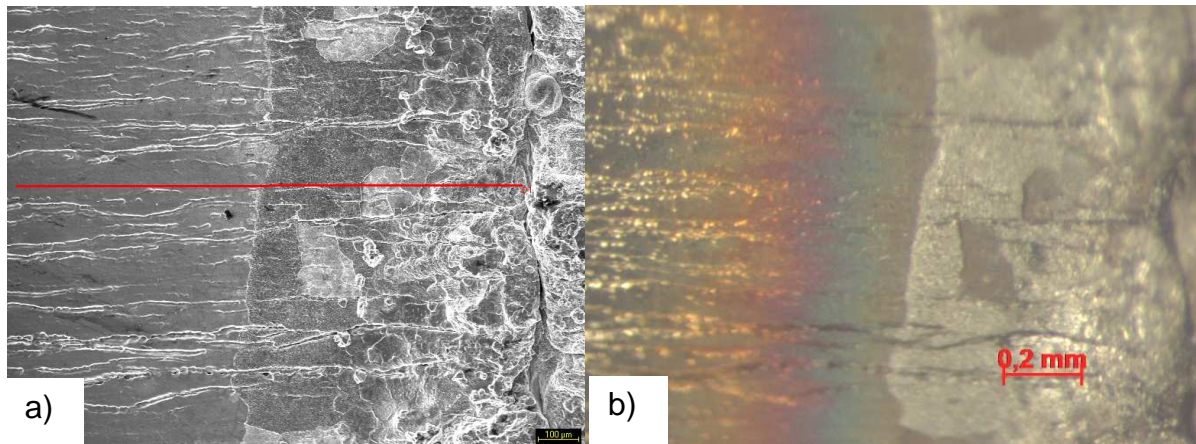
Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	68,85	$\pm 5,67$	67,77
Ni	10,39	$\pm 1,1$	11,39
Si	0,0	$\pm 0,0$	0,335
Mo	1,34	$\pm 0,34$	2,0
Cr	17,20	$\pm 1,43$	16,51
Mn	2,22	$\pm 0,31$	1,58

Die **Abbildung 29** zeigt eine Probe mit Anlauffarben, die ohne Wurzelschutz geschweißt wurde. Derselbe Bereich ist mit a) einem Rasterelektronenstrahlmikroskop und b) mit einem Auflichtmikroskop abgebildet. Der Vergleich zeigt, dass bis auf die Zunderschicht auf und direkt neben der Naht, eine direkte Darstellung der Anlauffarben mit einem Rasterelektronenstrahlmikroskop und der verwendeten Probenausrichtung nicht möglich ist. Aus diesem Grund wird versucht, mit Hilfe der EDX-Analyse die Sauerstoffanreicherung in der zur Nahtwurzel hin wachsenden Mischoxidschicht zu erfassen.

Der EDX-Linienscan wird für eine bessere Übersichtlichkeit im selben Bereich wie die in **Abbildung 29** gezeigten Bildbereiche durchgeführt. Das Ergebnis des Scans ist im Anhang abgebildet (Anlage 8). Die Zunahme des Sauerstoffanteils im Verlauf der Anlauffarben von gelb über rotbraun bis blaugrau ist deutlich zu erkennen. Die



Detektion von durch molekularen Sauerstoff verursachten Anlauffarben ist demnach ohne Probleme möglich.



**Abbildung 29:** Darstellung einer ohne Wurzelschutzgas geschweißten Probe (CrNi-Stahlrohr); a) Rasterelektronenstrahlmikroskopaufnahme; b) Auflichtmikroskopaufnahme

- **Auflichtmikroskop**

Für die Aufnahmen wird ein Auflichtmikroskop vom Typ Stemi 2000 C des Herstellers Zeiss eingesetzt. Für die Digitalisierung wird die Kamera Axi-Cam Icc verwendet. Die separat zuschaltbaren Lichtquellen befinden sich einmal senkrecht über dem Probenstisch (ringförmige Lichtquelle) und einmal versetzt neben dem Probenstisch mit einem Einstrahlungswinkel von 45°.

- **Metallografischer Schliff**

Für die Untersuchung des Einbrandverhaltens erfolgt die Einbettung ausgewählter Proben in Epoxidharz. Diese werden über mehrere Stufen geschliffen und anschließend poliert. Ergebnis ist eine polierte Oberfläche senkrecht zum Schweißnahtverlauf. Die mittlere Rauheit dieses Bereichs beträgt  $\leq 1 \mu\text{m}$ . Die so vorbereitete Probe wird in einer „V2A-Beize“ geätzt. Diese besteht aus 39 ml Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 52 ml Salzsäure ( $\text{HCl}$ ) und 9 ml Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$  mit einer Konzentration von 65 %). Durch die Korrosionsbeständigkeit des verwendeten Materials ist eine Ätzzeit von 210 s mit der verwendeten V2A-Beize bei 23 °C (Temperatur der Ätze) notwendig.

## 5.2 Einfluss der Feuchte in Wurzelschutzgasen

Die aus der Literaturrecherche bekannte Tatsache, dass Feuchte zu Anlauffarben führen kann, ist durch die Vielzahl der veränderlichen Umgebungsvariablen eine sehr allgemeine Aussage.

Im Folgenden werden die einzelnen Versuche kurz beschrieben, die verwendeten Geräte aufgezählt, die relevanten Parameter und der konkrete Ablauf vermerkt.

### 5.2.1 Schweißversuche bei konstanten und wechselnden Temperaturen

Bei den Schweißversuchen in der Klimakammer soll der Prozess des WIG-Orbitalschweißens unter kontrollierten klimatischen Bedingungen ablaufen. Um konstante Temperaturen ohne größere Schwankungen zu gewährleisten, wird der Prozess in einer Klimakammer bei -20 °C durchgeführt. Ziel ist der Nachweis der Schweißprozesssicherheit bei Temperaturen unter 0 °C und die Durchführbarkeit von anlauffarbenfreien Schweißungen bei Minusgraden unter kontrollierten Bedingungen. Ein weiterer Aspekt ist die Auswirkung der Kondenswasserbildung. So wird der Effekt eines schnellen Wechsels der Umgebungstemperatur auf den Schweißkopf nachgestellt, um mögliche Auswirkungen auf den Prozess aufzuzeigen.

- **Verwendete Geräte und Materialien:**

- Klimaprüfschrank WK 11 - 600/40
- Thermologger 309 mit 2 Thermoelemente Typ K
- Stromquelle ist die ARC M307
- Schweißkopf ARC M9-750 Rev. A
- Prozessgas Argon 5.0
- Zu- und Spülleitungen für Prozess- und Wurzelschutzgase: aus PFA und X2CrNiMo17-12-2 (Kapillarrohr)
- Probestücke 3/4"

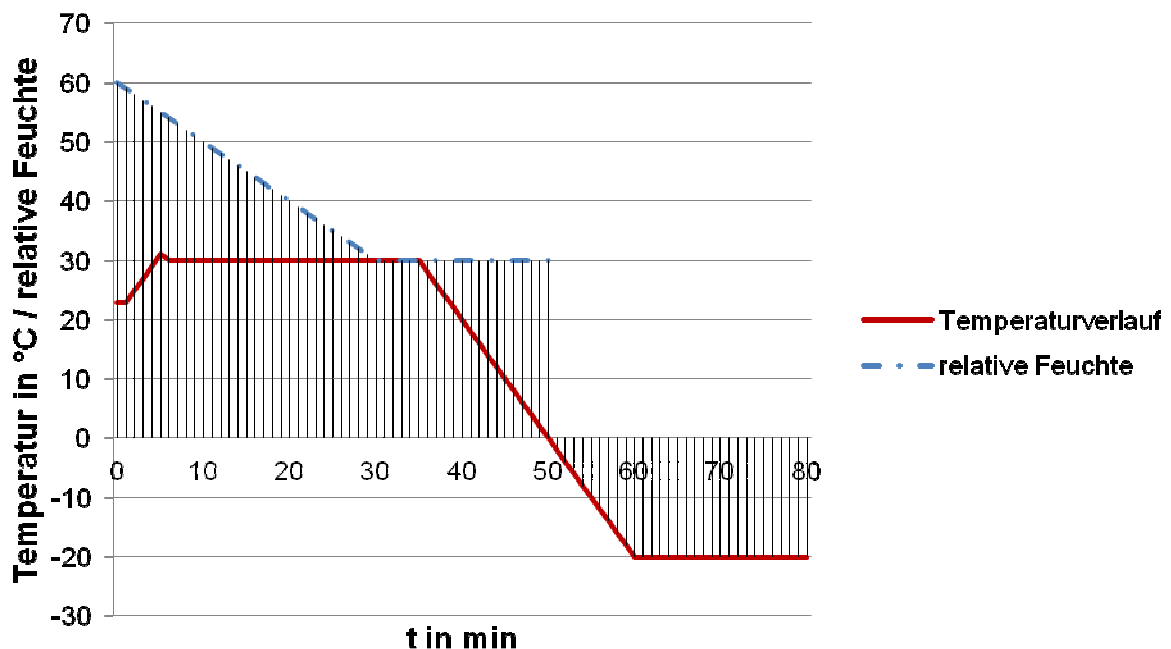
- **Parameterauswahl**

Bei dem Versuch in der Klimakammer ist vor allem die Temperatur- und Feuchteänderung über die Zeit von Bedeutung. Der Verlauf für die Akklimatisierung des Schweißkopfes und das Einstellen der Versuchstemperaturen ist in **Abbildung 30** dargestellt. Beim Erreichen der 0 °C-Grenze kommt es bei dem eingebauten Feuchtesensor zu einem Anzeigefehler. Aus diesem Grund wird der Sollwert an Feuchte bereits vor dem Erreichen der Messgrenze angefahren. Die bei der weiteren Abkühlung steigende relative Feuchtigkeit kondensiert beim Erreichen des Taupunktes an den Innenflächen der Klimakammer aus. Die Messung des Feuchtegehaltes bei Mi-

ausgraden ist nicht möglich. Dieser Effekt kommt der Realitätstreue zugute und muss deshalb nicht durch Gegenmaßnahmen gemindert werden.

Weitere wichtige Parameter sind die Prozessgastemperatur sowie die Probenstücktemperatur. Nach der Akklimatisierung haben die Probenstücke ebenfalls die Umgebungstemperatur von  $-20\text{ °C}$  erreicht.

Beim Schweißkopf wird eine Temperatur annähernd gleich der Umgebungstemperatur kurz vor Beginn des Prozesses angenommen. Durch die Größe und Leistungsfähigkeit der Kammer bleibt die Temperatur auch während des Prozesses annähernd konstant. Für die Simulation eines schnellen Wechsels wird ein weiterer Temperaturzyklus programmiert. Die Temperatur steigt dabei von  $-20\text{ °C}$  auf  $30\text{ °C}$  und wieder zurück auf  $-20\text{ °C}$ .



**Abbildung 30:** Temperaturverlauf der Trocknungsphase sowie Abkühlphase und Prozessbereich

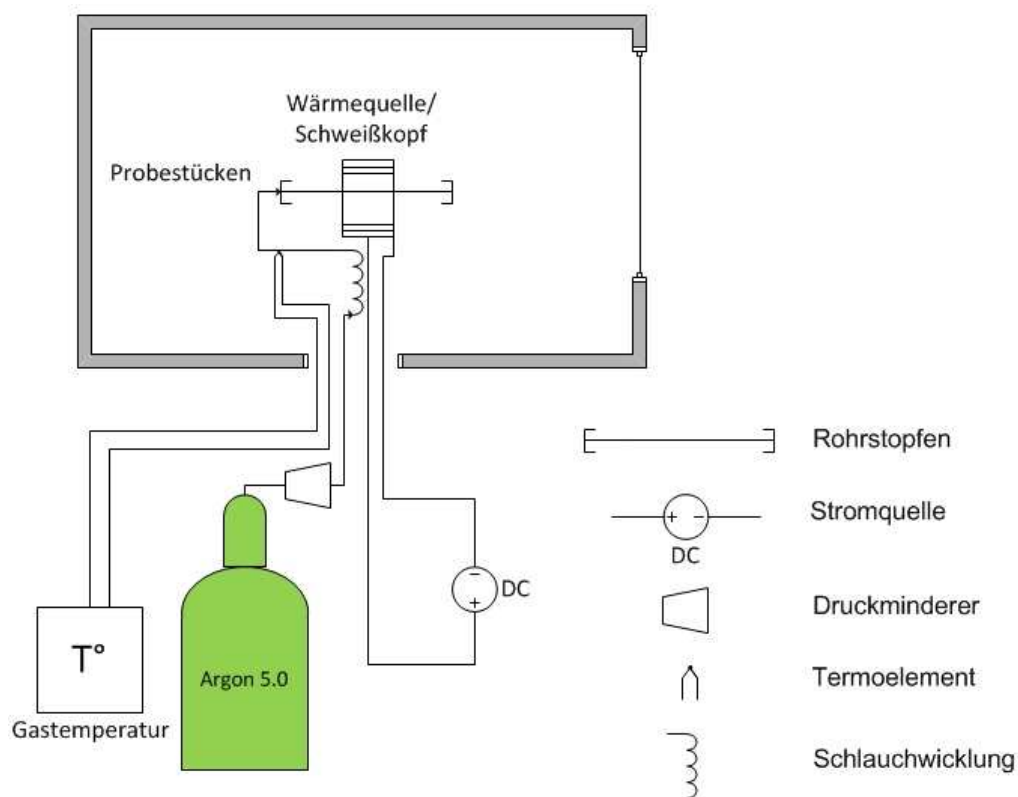
- **Aufbau und Ablauf**

Der prinzipielle Aufbau ist in **Abbildung 31** vereinfacht dargestellt. Die Schweißstromquelle, das Temperaturmessgerät und die Gasflasche mit dem Wurzelschutzgas befinden sich außerhalb der Klimakammer. Ein 10 m langes Kapillarrohr sorgt für die Abkühlung des Argons in der Klimakammer auf  $-20\text{ °C}$ . Das Erreichen der Versuchstemperatur wird durch Messung der Gasaustrittstemperatur am Ende des Kapillarrohrs überprüft.

Nach Einspannen der Probenstücke und dem Anschließen des Spülanschlusses (Wurzelschutzgas) und des Spülstopfens mit einer Auslassöffnung von etwa 3 mm wird die Klimakammer geschlossen. Nach Erreichen der Versuchstemperatur und

der Stabilisierung des Systems kann der Schweißprozess gestartet werden. Die verwendeten Proben werden dabei abwechselnd während der warmen Phase und während der kalten Phase eingebracht. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Schweißung von trockenen Probenpaaren und von Paaren mit einem leichten Kondensfilm auf der Oberfläche. Nach dem Einspannen der Proben erfolgt die Spülung mit kaltem, trockenem Wurzelschutzgas. Der Schweißkopf wird mit trockenem Prozessgas gespült.

Der Teil des Versuchs mit wechselnden Temperaturen wird durch Öffnen des Kopfes beim Aufheizen der Kammer und dem anschließenden Abkühlen ohne Gasspülung erreicht.



**Abbildung 31:** Versuchsaufbau konstante und wechselnde Temperaturen

### 5.2.2 Versuche zur Feuchteansammlung im Rohr

Die Tatsache der Feuchteansammlung während des Übergangs vom Werkstattbereich in den Außenbereich und der Lagerung im Freien wird anhand der Beschreibung der Zustände auf Winterbaustellen als gegeben angenommen.

Das Verhalten des Wurzelschutzgases beim Durchströmen eines feuchten Rohrabchnittes soll simuliert und die daraufhin im Wurzelschutzgas vorhandenen Feuchtekonzentration gemessen werden.

Aus der Feuchtekonzentration und der Spüldauer können anschließend Rückschlüsse auf die Wirksamkeit bisher angewendeter Spüldauern gezogen werden. Als Referenzwert wird eine vergleichbare aber trockene Probe mit dem selben Versuchsaufbau vermessen. Der dritte Probestyp besteht aus mehreren kurzen Stücken, die geplant und aneinander geheftet sind. Die Heftstellen werden mit dem in Kapitel 4.3 erwähnten Klebeband abgedichtet. Ziel ist die Untersuchung des Einflusses der abgedichteten Heftstellen auf die Durchflussmenge des Argons.

- **Verwendete Geräte**

- Zu- und Spülleitungen für Prozess- und Wurzelschutzgase: aus PFA und X2CrNiMo17-12-2 (Kapillarrohr)
- PM 880 AC Panametrics Portable Hygrometer mit dem MSI Probe Drucktaupunktsensor
- AERO2-MAT 4115-B
- vorbereitete Probestücke 101,6 mm (4")x 400 mm

- **Parameterauswahl**

Da die Menge der sich ansammelnden Feuchte mindestens von der Lagerdauer und den Temperaturschwankungen abhängig ist, wird sie als unbekannte Variable angenommen. Um den Extremfall zu simulieren, werden 20 ml Wasser mit Hilfe eines Sprühzerstäubers auf die Rohrwand aufgebracht.

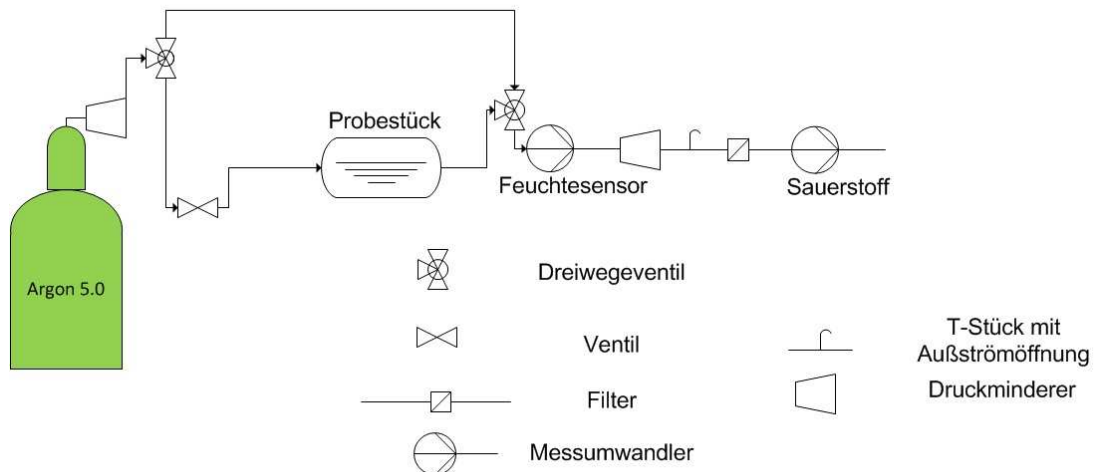
Die Anzahl der Heftstellen beträgt drei.

Der Sauerstoffgehalt wird auf unter 10 ppm festgelegt und mit dem Restsauerstoffmessgerät überprüft.

- **Aufbau und Ablauf**

Der Messaufbau für die Feuchtemessung ist in **Abbildung 32** dargestellt. Der Gasdruck der Gasflasche wird durch einen Druckminderer geregelt. Hinter dem Druckminderer folgt ein Dreiwegeventil, an dem die Rohrprobe und eine Parallelleitung angeschlossen sind. Über die Parallelleitung kann der gesamte Messaufbau nach der Montage und zwischen den Messungen freigespült werden. Nach dem zweiten Dreiwegeventil folgt der Feuchtesensor und ein weiterer Druckminderer. Dieser ermöglicht die Messung der Feuchte bei verschiedenen Drücken. Hinter dem Druckminderer ist ein T-Stück mit Ausströmöffnung montiert. Dies ist nötig, da das Sauerstoffmessgerät nicht für Überdrucke ausgelegt ist.

Die verschiedenen Probestypen werden nacheinander in den Versuchsaufbau eingebaut. Die feuchte Probe wird als letzte vermessen, um die Reaktionszeit der Messanordnung und damit die benötigten Spüldauern zwischen den Versuchen zu verkürzen.



**Abbildung 32:** Versuchsaufbau Feuchtemessung

### 5.2.3 Versuch zur Bildung von Anlauffarben bei unterschiedlichen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas

Mit diesen Untersuchungen soll der Zusammenhang zwischen der im Wurzelschutzgas vorhandenen Restfeuchte und der Entstehung von Anlauffarben untersucht werden. Die Stärke der Anlauffarbenausbildungen soll dabei einer bestimmten Konzentration an Feuchtigkeit zugeordnet werden. Ziel ist die Festlegung eines Grenzwertes für Feuchte, analog zu dem für den Restsauerstoffgehalt geltenden Grenzwert von 30 ppm.

Die Versuche werden unter Laborbedingungen und im Freien unter Winterbedingungen durchgeführt.

- **Verwendete Geräte:**

- PM 880 AC Panametrics Portable Hygrometer mit dem MSI Probe Drucktaupunktsensor Stromquelle: ARC M307
- Schweißkopf ARC M9-750 Rev. A
- Schweißkopfstände
- AERO2-MAT 4115-B
- Zu- und Spülleitungen für Prozess- und Wurzelschutzgase aus PFA und X2CrNiMo17-12-2 (Kapillarrohr)
- Probestücke 3/4"

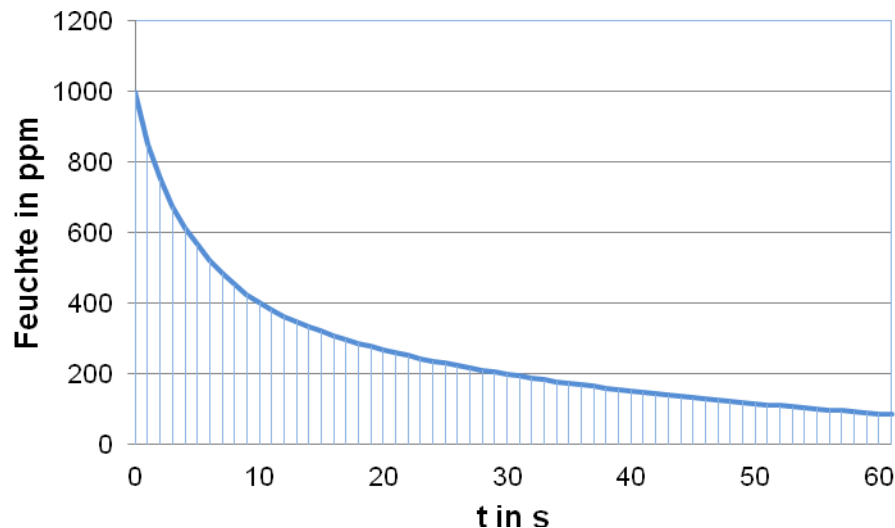


- **Parameterauswahl**

Das verwendete Wurzelschutzgas Argon mit der Reinheit 5.0 muss für diese Versuche mit Feuchte angereichert werden. Für die Anreicherung im Laborversuch wird ein ähnlicher Versuchsaufbau wie in **Abbildung 32** verwendet. Es steht dadurch bei der Verwendung eines 4" Rohren mit einer Länge von 400 mm (+50 mm Verschlusskappe je Seite) und einem Druck von 1,5 bar ein Gasvolumen von ca. 4,3 l in der Befeuchtungskammer zur Verfügung. Dieses Volumen würde für etwa eine Minute Versuchszeit reichen. Durch das Nachströmen von trockenem Argon ändert sich aber die Konzentration im Laufe des Versuchs. Die Abhängigkeit ist in **Abbildung 33** dargestellt. Die Startkonzentration ist dabei von der Gastemperatur und der Verweildauer des Gases in der Befeuchtungskammer vor dem Versuchsstart abhängig.

Für den Versuchsaufbau im Außenbereich bei -6 °C erfolgt die Anreicherung durch einen ca. 6 m langen 1/4" Schlauch, der zwei Wochen im Freien gelagert wird. Während der Lagerung ist der Schlauch mit Stopfen verschlossen. Die verwendeten Probenstücke werden ebenfalls über Nacht im Freien gelagert. Die Lagerung erfolgt verschlossen in einem Kunststoffbeutel.

Der Sauerstoffgehalt wird auf unter 20 ppm festgelegt, um mögliche Abweichungen durch den Einfluss von Sauerstoff auszuschließen.

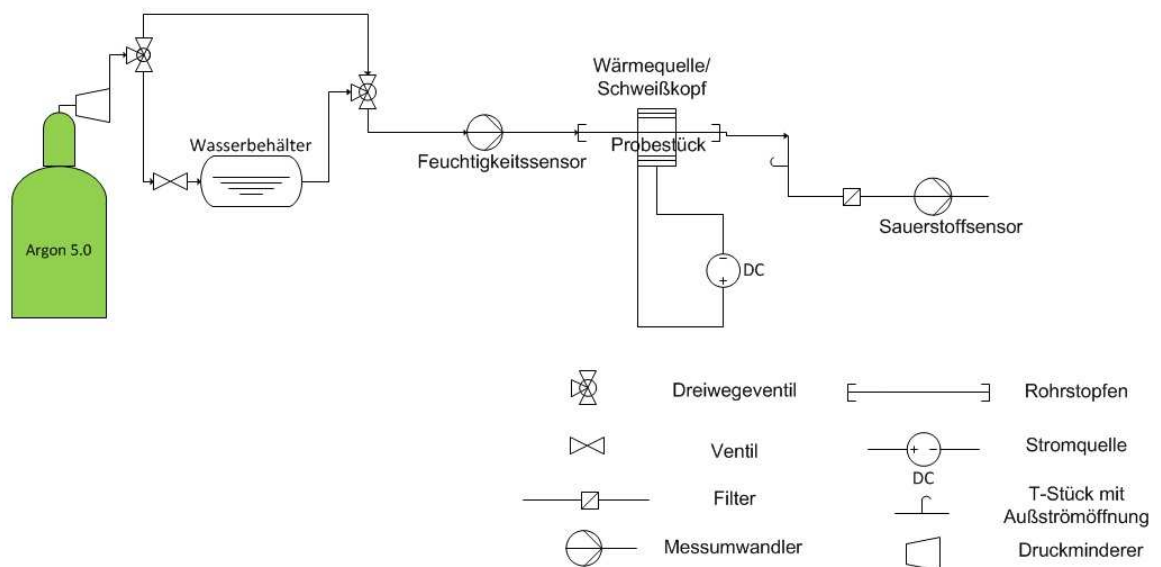


**Abbildung 33:** Konzentrationsverlauf in der Befeuchtungskammer

- **Aufbau und Ablauf**

Der genaue Aufbau für die Versuche unter Laborbedingungen ist in **Abbildung 34** dargestellt. Als Befeuchtungskammer wird ein 4" Rohr mit einer Länge von 400 mm verwendet. Auf die Innenwand wird mit Hilfe eines Zerstäubers ein feiner Wasserfilm aufgebracht. Diese möglichst gleichmäßig verteilte Feuchtigkeitsquelle sorgt für eine

schnelle Anreicherung des Argons. Zwischen dem Feuchtemessgerät und dem Sauerstoffmessgerät erfolgt die Einkopplung der Probenstücke für die Schweißung. Für die Außenversuche ist der Versuchsaufbau deutlich zu vereinfachen. Dies ist notwendig, um einerseits die benötigte Vorbereitungszeit zu verkürzen, und andererseits die Rohrlängen zwischen Gasanschluss, Feuchtemessgerät und den Probenstücken möglichst kurz zu halten. Eine Änderung des Feuchtegehaltes zwischen Messpunkt und Schweißnaht wird so möglichst gering gehalten. Der Ablauf der Versuche im Freien und unter Laborbedingungen ist dabei vom Prinzip her gleich. Bei den Laborversuchen wird lediglich die Feuchtekammer mit Argon geflutet und eine etwa halbstündige Wartezeit eingehalten, um eine ausreichend hohe Startkonzentration zu gewährleisten. Die einzelnen Schweißproben werden in Abhängigkeit von der Konzentration erzeugt. Da besonders bei den hohen Konzentrationen die Änderung sehr schnell erfolgt, werden diese Proben in mehreren Anläufen erstellt. Die Einhaltung des festgelegten Grenzwertes wird mit dem Restsauerstoffmessgerät überprüft.



**Abbildung 34:** Versuchsaufbau Bildung von Anlauffarben bei unterschiedlichen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas

### 5.3 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung für die Gasgemische Ar, Ar/He, Ar/He/H<sub>2</sub>

Für den Vergleich der Gase werden Einschweißversuche mit dem jeweiligen Gas und vergleichbaren Parametersätzen durchgeführt. Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der durch Zumischung von Helium und Wasserstoff erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit. Um mögliche Vorteile für das Einbrandverhalten zu untersuchen,

erfolgt auch eine Versuchsreihe pro Gas mit einer Reduzierung der Streckenenergie durch Absenken der Stromstärke.

- **Verwendete Geräte**

- Stromquelle: ARC M307
- Schweißkopf ARC M9-750 Rev. A
- Zu- und Spülleitungen für Prozess- und Wurzelschutzgase: aus PFA und X2CrNiMo17-12-2 (Kapillarrohr)
- Probenstücke aus X2CrNiMo17-12-2 mit einem Außendurchmesser von 3/4"

- **Parameterauswahl**

Für die Schweißprogrammerstellung werden dieselben Parameter wie für die Klimakammer- und Anlauffarbenversuche verwendet. Für die Gasgemische Argon/Helium und Argon/Helium/Wasserstoff erfolgt jedoch eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit. Zum Ausbilden einer feinschuppigen Nahtoberfläche (60 % Überlappung) muss die Pulsdauer bei starken Erhöhungen der Vorschubgeschwindigkeit ebenfalls angepasst werden.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Gasdurchflussmenge für das Prozessgas.

Durch die unterschiedlichen Gasdichten der einzelnen Mischgaskomponenten weicht die tatsächliche Durchflussmenge von den am Argon-Flowmeter angezeigten Werten ab. Die Berechnung der Korrekturfaktoren erfolgt über Gleichung (11) für Ar/He und Gleichung (12) für Ar/He/H<sub>2</sub>. [2]

Die verwendeten Gasgemische mit dem jeweiligen Anzeigewert am Flowmeter, dem Korrekturfaktor und dem tatsächlichen Wert sind in Tabelle 13 dargestellt. [2]

$$K = \sqrt{\frac{\rho_{Ar}}{(\rho_{He} \cdot \chi_{He} + \rho_{Ar} \cdot \chi_{Ar})}} \quad (11)$$

$$K = \sqrt{\frac{\rho_{Ar}}{(\rho_{He} \cdot \chi_{He} + \rho_{Ar} \cdot \chi_{Ar} + \rho_{H_2} \cdot \chi_{H_2})}} \quad (12)$$

Bei der Verwendung von Gasgemischen mit Heliumanteil ist die Gasdurchflussmenge generell zu erhöhen. Der genaue Wert ist dabei hauptsächlich abhängig vom Volumenanteil des Heliums am Gesamtgemisch, den Schweißparametern und dem Brenneraufbau. Da für das Gasgemisch Ar/He/H<sub>2</sub> noch keine Erfahrungswerte vorliegen, wird die Durchflussmenge von 5 l/min (Standardwert für Argon) bis 10 l/min variiert.

Die Materialstärke ist auf 1,65 mm festgelegt. Um möglichst anwendungsnahe Ergebnisse zu erhalten, wird das Prozessfenster durch die Bedingung eingegrenzt, dass die Naht durchgeschweißt sein muss.

**Tabelle 13:** Verwendete Gasgemische und deren Korrekturfaktor für Argon-Flowmeter

Gas bzw. Gasgemisch- bezeichnung	Zusammensetzung			Parameter Gasdurchfluss		
	Argon	Helium	Wasser- stoff	Argon- Flowmeter Einstell- wert	Korrektur -faktor	Durchfluss
	[%]	[%]	[%]	[l/min]	[l/min]	[l/min]
Ar 5.0	100	-	-	5	1	5
Ar/He	70	30	-	5	1,17	5,85
Ar/He/H <sub>2</sub>	20	70	10	5	1,9	9,5

- **Versuchsaufbau**

Für die einzelnen Prozessgase werden vorgemischte Gase verwendet. Der Versuchsaufbau besteht damit nur aus der jeweiligen Gasflasche, einem Druckminderer, einem Argon-Flowmeter und den Verbindungsschläuchen zur Schweißmaschine. Als Wurzelschutzgas wird zur besseren Vergleichbarkeit und aus Kostengründen reines Argon verwendet.

## 6 Auswertung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen

### 6.1 Anlauffarben auf Winterbaustellen

#### 6.1.1 Einfluss der Außentemperatur auf den Schweißprozess

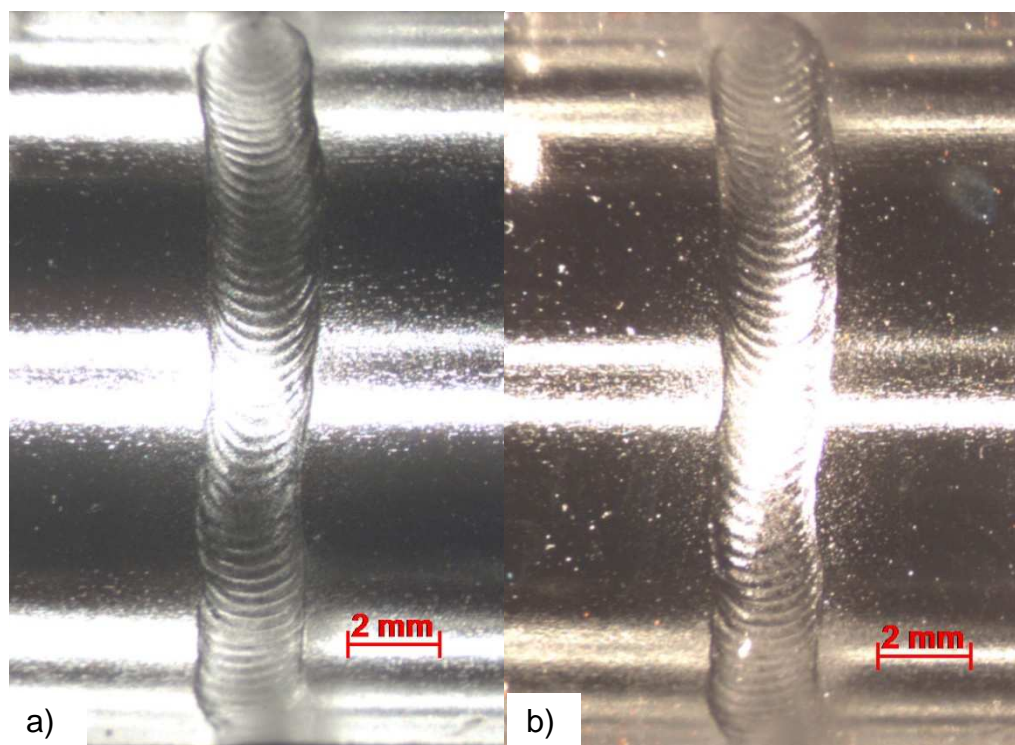
- **Konstante Temperaturbedingung**

In der zur Verfügung stehenden Zeit für die Nutzung der Klimakammer konnten sechs Versuche durchgeführt werden. Die geringe Anzahl an Proben lässt keine statistisch gesicherte Aussage zu. Die folgende Auswertung kann deshalb nur als Tendenz gewertet werden.

Bei den Versuchen zur Temperaturabhängigkeit wurde versucht, alle Parameter bis auf die Temperatur und die Feuchtekonzentration in der Umgebungsluft möglichst konstant zu halten. Die Schweißung der einzelnen Proben erfolgt deshalb mit identischen Parametersätzen (vergleiche Kapitel 5.1.3).

Die Schweißproben der einzelnen Versuche sind im Anhang abgebildet (Anlage 9).

In **Abbildung 35** ist die erste Probe der Versuchsreihe zu sehen. Im Inneren sind weder bei senkrechtem Lichteinfall noch bei Kombination einer senkrechten und einer im 45 °Winkel einstrahlenden Lichtquelle Anlauffarben sichtbar.



**Abbildung 35:** elektropolierte Oberfläche; CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ a) Lichtquelle 90° zum Probestisch b) zwei Lichtquellen Quelle 1: 90° Quelle 2: 45° zum Probestisch

Die Aufnahme mit der kombinierten Lichtquelle ist sinnvoll, da bei einem Lichteinfall im 45 ° Winkel auch schwache Anlauffarben registriert werden können, die mit der zur Verfügung stehenden Aufnahmetechnik nur schlecht erfassbar sind.

Fünf von sechs Proben zeigen dabei ein vergleichbares Oberflächenbild hinsichtlich Anlauffarben in der Nähe der Nahtwurzel und in der WEZ. Bei diesen Proben ist demnach eine anlauffarbenfreie Schweißung bei -20 °C mit trockenem, kaltem Wurzelschutzgas gelungen. Das beim Einspannen der Probe vorhandene Kondenswasser wurde ohne Probleme in der vorgesehenen Spüldauer aus dem Rohrrinneren ausgespült.

Wird die Betrachtung auf die Unregelmäßigkeit, Schweißnahtmittlenabweichung ausgeweitet, liegen noch vier von sechs Proben im akzeptablen Bereich.

Bei den Proben mit inakzeptablen Abweichungen handelt es sich um die direkte und indirekte Wirkung der gewollten Parameteränderung hinsichtlich des Temperaturverlaufs.

- **Wechselnde Temperaturbedingungen**

Wie erwartet bewirkt ein schneller Wechsel von -20 °C auf 30 °C und wieder zurück auf -20 °C eine deutliche sichtbare Kondenswasserbildung innerhalb der Klimakammer. Durch die zeitnahe Abkühlung zurück auf -20 °C gefriert die Kondenswasserschicht. Das Ergebnis der während der Warmphase eingespannten Probe ist in **Abbildung 36** zu sehen. An der Probe sind starke Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Schweißnahtwurzelbreite und der Schweißnahtmittigkeit fest zu stellen. Mit der Kombination einer im 90 ° und einer im 45 ° Winkel einstrahlenden Lichtquelle kann auch die relativ schwach ausgeprägte Anlauffarbe auf der linken Seite der Nahtwurzel sichtbar gemacht werden. Hierbei handelt es sich um den in **Abbildung 36 b)** deutlich sichtbaren weißblauen Saum auf der linken Seite der Nahtwurzel. In **Abbildung 37** ist die Verfärbung in direkter Nähe der stellenweise breiteren Schweißnahtwurzel im Detail abgebildet.

In der zweiten Hälfte des Rohres sind die Verfärbungen zwar noch sichtbar, aber deutlich schwächer. Die unterschiedliche Schweißnahtwurzelbreite und Schweißnahtmittlenabweichung ist jedoch unverändert.

Die in direkter Folge geschweißte Probe weist zwar die Formabweichung, nicht jedoch die Verfärbungen auf.

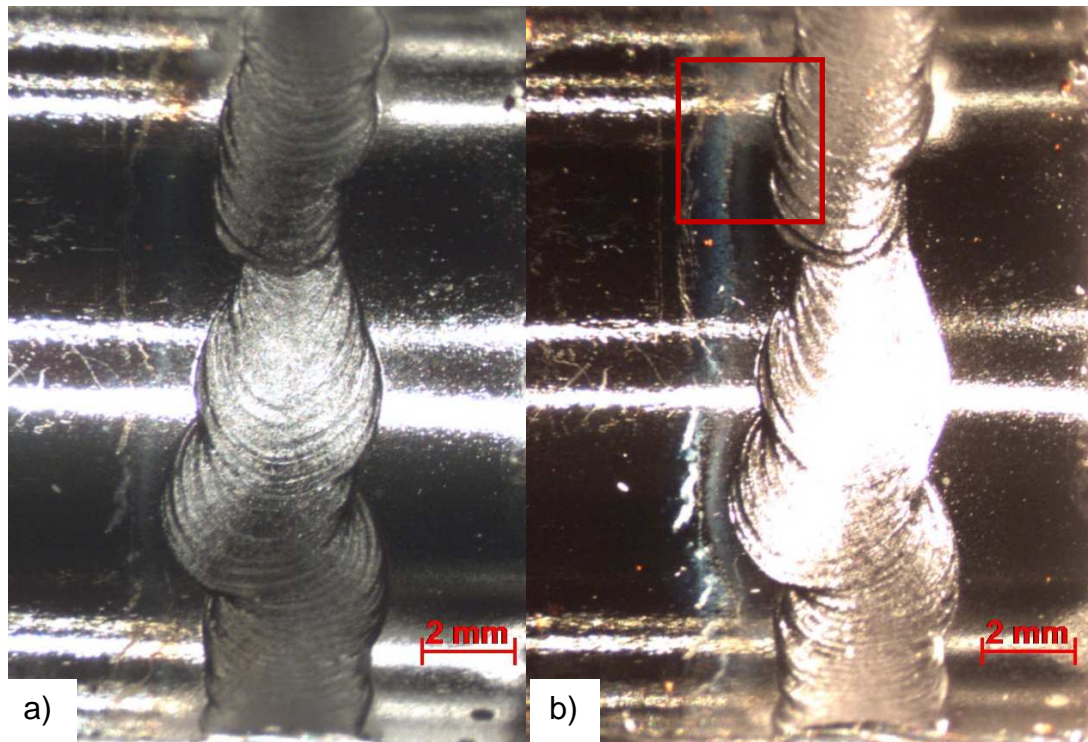
Nach dem Wechsel der Elektrode sind in der darauffolgenden Probe auch keine Formabweichungen mehr vorhanden.

Eine mögliche Erklärung für das Auftreten der Anlauffarben in nur dieser einen Probe besteht in einer mangelhaften Positionierung der Probestücke, wodurch ein Spalt zwischen den plangedrehten Rohrenden entsteht. Feuchte bzw. Sauerstoff und Wasserstoff könnten so vor dem Lichtbogen und dem Schmelzbad in das Rohrrinnere

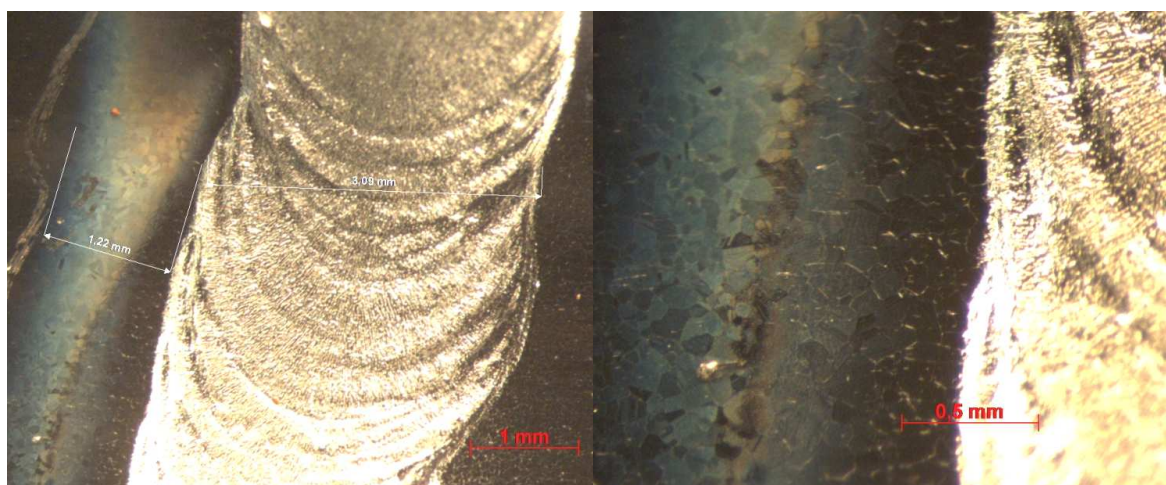


strömen und dort rekombinieren, bzw. direkt in der WEZ zur Bildung der Mischoxidschicht führen. Diese Theorie lässt sich anhand der Ergebnisse nicht direkt belegen. Sie deckt sich jedoch gut mit den stark lokal auftretenden Anlauffarben.

Diese Beobachtungen während des Versuchs und die bei der Schweißung aufgetretenen Unregelmäßigkeiten decken sich mit den Beschreibungen in den Erfahrungsberichten des Schweißpersonals. Die Schwierigkeiten bei starken Temperaturwechseln sind demnach beherrschbar, aber zeitaufwendig und damit kostenintensiv.



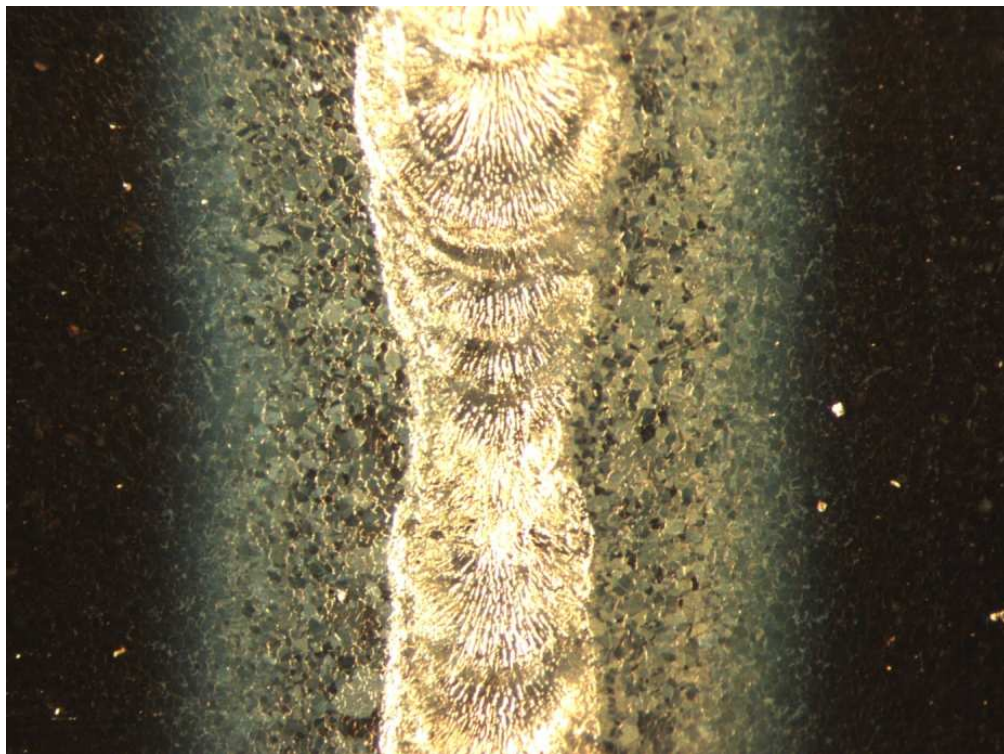
**Abbildung 36:** elektropolierte Oberfläche, CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ a) Lichtquelle 90° zum Probestisch b) zwei Lichtquellen Quelle 1: 90° Quelle 2: 45° zum Probestisch



**Abbildung 37:** elektropolierte Oberfläche, CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ; Schweißnahtunregelmäßigkeiten: Verfärbungen neben der Schweißnaht; Lichtquelle 45° zum Probestisch

- **Untersuchung der Anlauffarben mittels EDX**

Im Zuge der aufgetretenen Anlauffarbenausprägungen besteht die Frage der Vergleichbarkeit mit durch Sauerstoff induzierten Anlauffarben. **Abbildung 38** zeigt eine bei etwa 450 bis 500 ppm Feuchte (vergleiche Anlage 10) geschweißte Probe. Ähnlich der bei Sauerstoff induzierten Anlauffarben festgestellten Konzentrationserhöhung des Sauerstoffanteils in Richtung der Schweißnahtwurzel (vergleiche Kapitel 5.1.4), muss auch eine Sauerstofferhöhung bei den durch Feuchte induzierten Anlauffarben feststellbar sein. Zur Prüfung dieser Annahme wird bei der in **Abbildung 38** gezeigten Probe ebenfalls ein EDX-Linienscan durchgeführt.

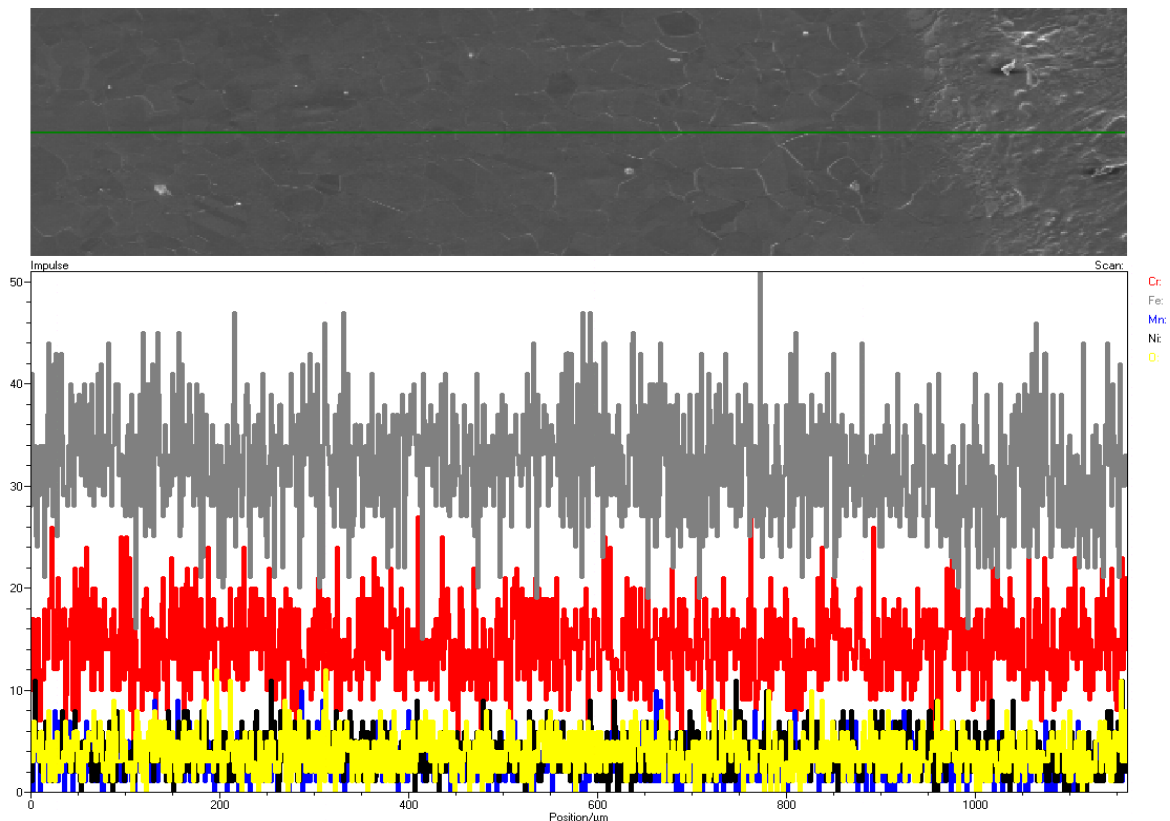


**Abbildung 38:** elektropolierte Oberfläche; CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ; Schweißnahtunregelmäßigkeiten: Verfärbungen neben der Schweißnaht; Lichtquelle 45° zum Probestisch

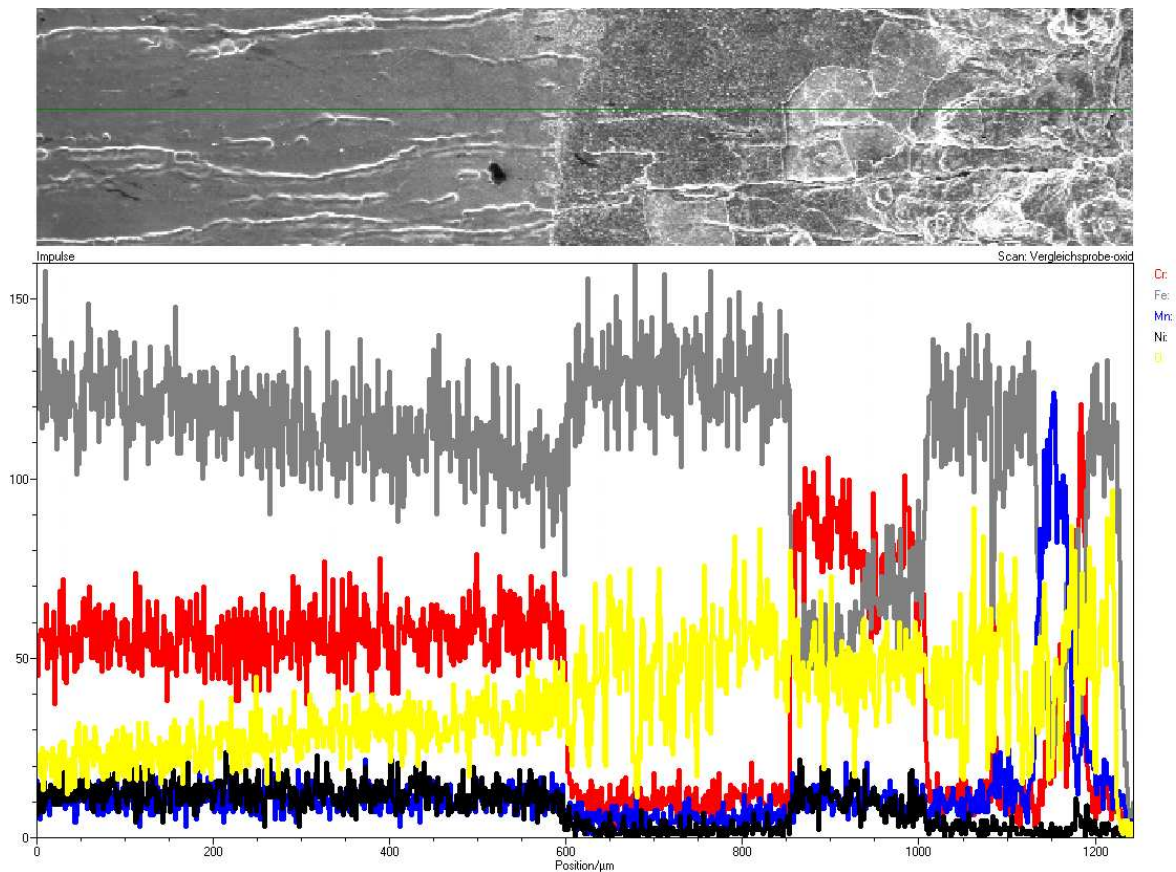
Die Ergebnisse des Scans sind in **Abbildung 39** dargestellt und werden den Ergebnissen einer durch molekularen Sauerstoff verursachten Anlauffarbe in **Abbildung 40** (vergleiche Kapitel 5.1.4 ) gegenübergestellt. Dabei ist eine direkte Vergleichbarkeit nicht zu erwarten, da sich erstens die verursachenden Konzentrationen stark unterscheiden und zweitens die Reaktivität des Wassermoleküls geringer ist als die des Sauerstoffmoleküls (freiwerdender Wasserstoff wirkt zusätzlich reduzierend). Jedoch müssten die Scans bei den Positionen 800 bis 1000 in **Abbildung 39** und 0 bis 200 (hellgelbe Anlauffarben) in **Abbildung 40** eine ähnliche für die Schichtdickenzunahme charakteristische Sauerstoffanreicherung zeigen. Der in **Abbildung 39** ermittelte Sauerstoffwert bleibt allerdings über die gesamte abgetastete Strecke gleich.



Die Schichtdickenzunahme ist demnach so gering, dass sie unter der Auflösungsgrenze der EDX-Analyse liegt, und muss daher geringer sein als die für gelbe Anlauf-  
farben verantwortliche Schichtdicke von 25 bis 50 nm. Aus den aus der Literatur be-  
kannten Zusammenhängen zwischen Schichtdicke und dem Verhältnis des Chrom-  
zu Eisenanteils in der Oxidschicht lässt sich auch eine Aussage über die Korrosions-  
beständigkeit treffen. Demnach dürften die gezeigten CrNi-Stahlproben trotz sichtba-  
ren, durch Feuchte verursachten gelbraunen Anlauffarben bis zu einem Feuchtekon-  
zentrationenwert von etwa 500 ppm keine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Korrosion  
vorweisen. Die Richtigkeit dieser Annahme muss jedoch noch durch Korrosionsver-  
suche überprüft werden.



**Abbildung 39:** EDX-Linienscan einer Probe mit durch erhöhte Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas (ca 450-500 ppm) verursachten Anlauffarben; Cr: rot, Fe: grau, Mn: blau, Ni: schwarz, O: gelb



**Abbildung 40:** EDX-Linienscan einer Probe mit durch molekularen Sauerstoff in hoher Konzentration (Umgebungsluft) verursachten Anlauffarben; Cr: rot, Fe: grau, Mn: blau, Ni: schwarz, O: gelb

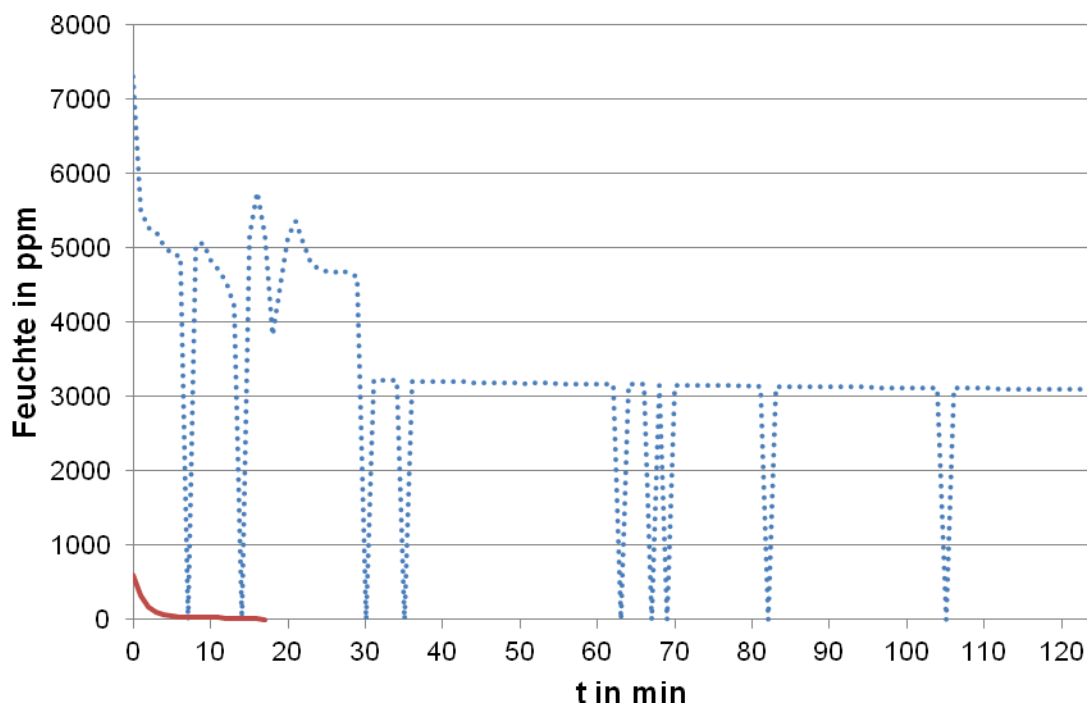
### 6.1.2 Einfluss von Feuchteansammlungen in Rohren

- **Trocknung**

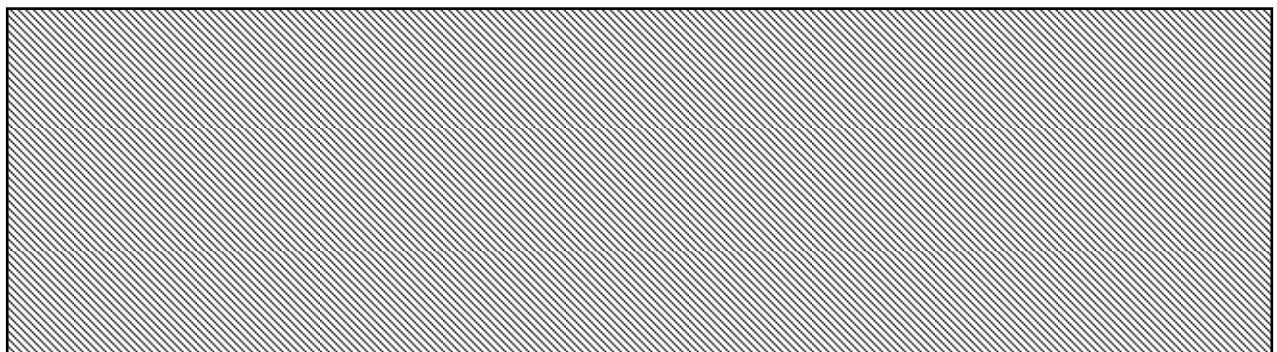
Um die Auswirkungen von Wasseransammlungen im Inneren von zu schweißenden Bauteilen unter Zuhilfenahme von Wurzelschutzgas besser zu verstehen, ist die Anfertigung einer realitätsnahen Rohrprobe notwendig. Die angefeuchtete Probe wird mit Argon gespült und das Wurzelschutzgas nach Ausströmen aus der Probe hinsichtlich der Zunahme der Feuchtekonzentration gemessen. Als Vergleich wird eine trockene Probe mit denselben Abmessungen gespült und vermessen.

Die Ergebnisse dieser beiden Versuche sind in **Abbildung 41** dargestellt. Während die rot eingezeichnete trockene Probe innerhalb von 3 min eine Feuchtekonzentration von unter 100 ppm erreicht, kommt die feuchte Probe lediglich auf einen Wert von 5500 ppm. Der starke Rückgang der Feuchtekonzentration in der feuchten Probe ist dabei durch das Einstellen eines Partialdruckgleichgewichts zwischen der feuchten Oberfläche und dem Gasvolumen bzw. dem Gasvolumenstrom zu erklären. Die dabei stattfindenden Diffusions- und Mischprozesse laufen in einer vom Partialdruckgradienten und von der Stärke der auftretenden Verwirbelungen abhängigen Geschwindigkeit ab. Steht das Gas in der Probe (Zeit bis zum Start der Messung) kann

sich deutlich mehr Feuchte im Gas ansammeln. Wird die Messung gestartet, wird das gesättigte Volumen ausgespült und durch trockeneres Gas ersetzt. Zwischen der Durchflussgeschwindigkeit und der Feuchtekonzentration stellt sich ein Gleichgewicht ein. Dieses liegt bei diesem Versuchsaufbau bei etwas über 3000 ppm. Mit einer Reduzierung des verfügbaren flüssigen Wassers nimmt auch die Sättigung des Gasstromes ab. Die Gesamtmesszeit bis zum Erreichen einer Feuchtekonzentration von unter 100 ppm beträgt bei dieser Probe etwa 11 h. Da die tatsächliche Menge an angesammelter Feuchte in realen Rohrsegmenten auf Winterbaustellen bisher nicht ermittelt wurde, kann zum Zeitpunkt dieser Arbeit kein Rückschluss aus den vorliegenden Messungen auf eine tatsächliche Spüldauer erfolgen. Eine überschlägige Hochrechnung der Werte für die Probenrohlänge 500 mm auf ein Rohrsegment von 12 m ergibt eine theoretische Spülzeit von etwas über 9 Tagen.



**Abbildung 41:** Konzentrationsverlauf; Probe mit Wasser befeuchtet (blau); Probe trocken (rot) Durchflussmenge 2 l/min



- **Vergleich mit Sauerstoffkonzentration**

Die parallel gemessene Sauerstoffkonzentration fällt innerhalb von 3 min auf einen Wert von 8 ppm. Diese Zeit entspricht auch der Empfehlung für die Vorspülzeit eines 4" Rohres nach DVS Merkblatt DVS 0937 dieser Länge (500 mm). [24]

Die zum selben Zeitpunkt ermittelte Feuchtekonzentration von etwa 100 ppm muss demnach mindestens dem Grenzwert für anlauffreies Schweißen bei normaler Raumtemperatur (15-30 °C) entsprechen, denn auch unter normalen Bedingungen muss die Spülzeit ausreichen, um sowohl Sauerstoff als auch Feuchte aus dem Rohr zu entfernen.

### 6.1.3 Einfluss von unterschiedlichen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas

- **Versuchsdurchführung bei 23 °C**

Der in verschiedenen Quellen erwähnte Zusammenhang zwischen Anlauffarben und Feuchte konnte in den Versuchen bestätigt werden. **Abbildung 42** und **Abbildung 43** zeigen jeweils einen Auszug aus der im Anhang (Anlage 10) abgebildeten Versuchsreihe zur Abhängigkeit der Anlauffarbenausprägung von der Feuchtekonzentration. Die gezeigten Proben wurden alle mit demselben Parametersatz geschweißt, und die Befeuchtung des Wurzelschutzgases erfolgte mit identischem Versuchsaufbau.

Die durch Feuchte im Wurzelschutzgas verursachten Anlauffarben zeigen eine direkte Abhängigkeit von der Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas. Sinkt die Konzentration, wird die Ausprägung der Anlauffarben schwächer.

Durch die Ergebnisse lässt sich ein Grenzwert von 300 ppm für anlauffarbenfreies Schweißen bei einer Raumtemperatur von 23 °C feststellen.

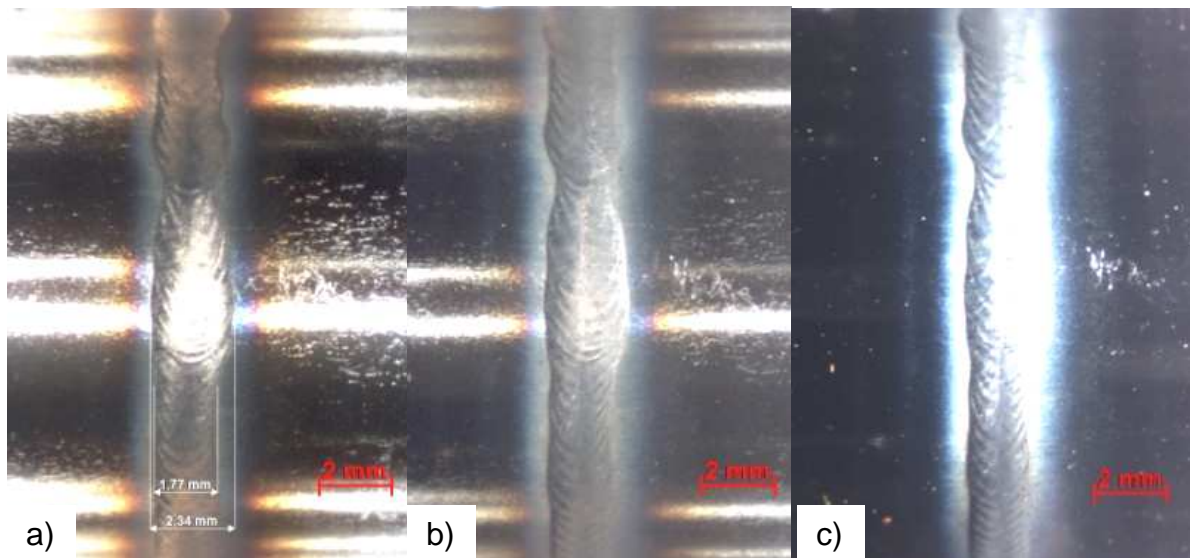
Die Aufnahmen wurden jeweils unter drei unterschiedlichen Lichteinstrahlungsbedingungen gemacht.

Die in **Abbildung 42** gezeigte Probe mit Anlauffarben entspricht der mit dem gegebenen Versuchsaufbau maximal erreichbaren Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas. **Abbildung 42 a)** zeigt die dabei entstandenen Anlauffarben unter annähernd idealen Bedingungen. Das heißt, es wird ein Leuchtmittel mit konstantem Leuchtspektrum verwendet und dieses senkrecht über der Probe positioniert. **Abbildung 42 b)** zeigt dieselbe Schweißnahtwurzel bei der Beleuchtung durch zwei Lichtquellen, wobei die eine senkrecht die andere in einem Winkel von 45° zum Proben-tisch positioniert ist. In **Abbildung 42 c)** ist dieselbe Schweißnahtwurzel bei einer Beleuchtung aus einem Winkel von 45° dargestellt. Der weißblaue Saum in **Abbildung 42 c)** beidseitig der Schweißnahtwurzel entsteht dabei durch Totalreflexion der einfallenden Lichtstrahlen an den Mischoxidschichten. Dieser Effekt bietet eine zu-

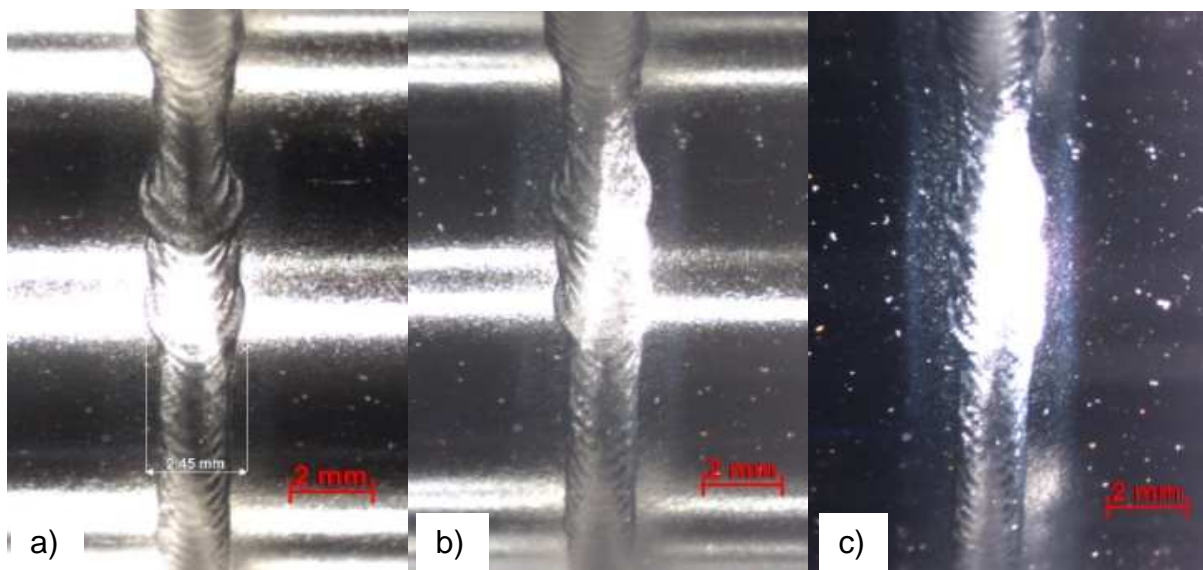


verlässige Möglichkeit des Nachweises von Mischoxidschichten auch oberhalb der strohgelben Farbausprägung, die nicht unter allen Lichtbedingungen erkennbar ist. Diese Beleuchtungsart hat zusätzlich besondere Bedeutung bei der Endoskopie von Schweißnähten in Rohren. Bei den meisten am Markt üblichen Modellen ist die Lichtquelle an der Spitze des Endoskops angebracht. Die Beleuchtung erfolgt dabei ebenfalls in einem Winkel  $<90^\circ$  und  $>30^\circ$ . Da bei dieser Beleuchtung auch geringe Anlauffarben durch Totalreflexion verstärkt werden, ist es notwendig auch hier eine Einschätzung anhand einer Farbskala vornehmen zu können.

In **Abbildung 43** ist das untere Ende der Farbskala zu sehen. Weder bei der direkten Beleuchtung noch bei der Beleuchtung im  $45^\circ$  Winkel sind Anlauffarben zu erkennen.



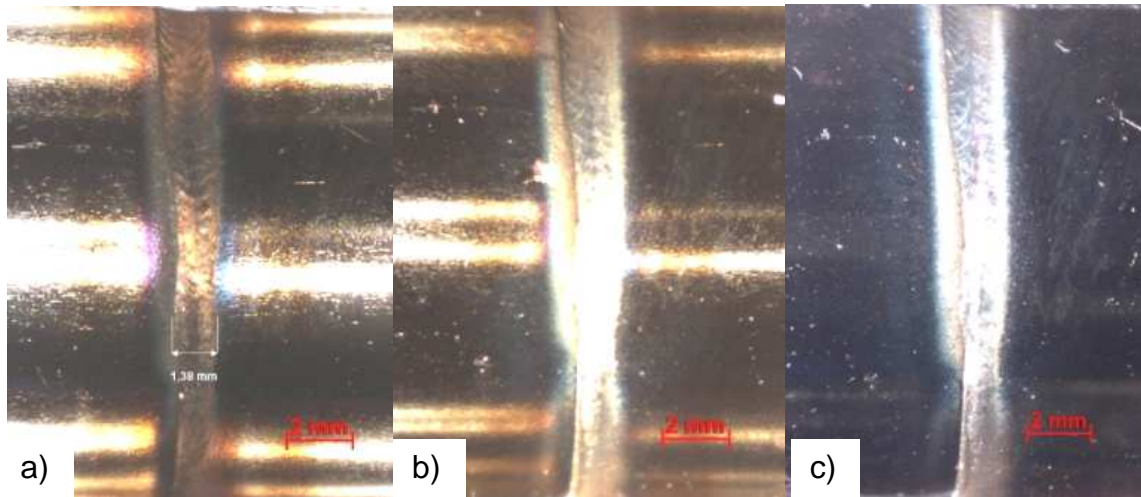
**Abbildung 42:** Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarben bei einer Feuchtekonzentration von 1200 ppm im Wurzelschutzgas bei  $23^\circ\text{C}$  Raumtemperatur; a) Lichteinstrahlung  $90^\circ$ ; b) Lichteinstrahlung  $90^\circ+45^\circ$ ; c) Lichteinstrahlung  $45^\circ$



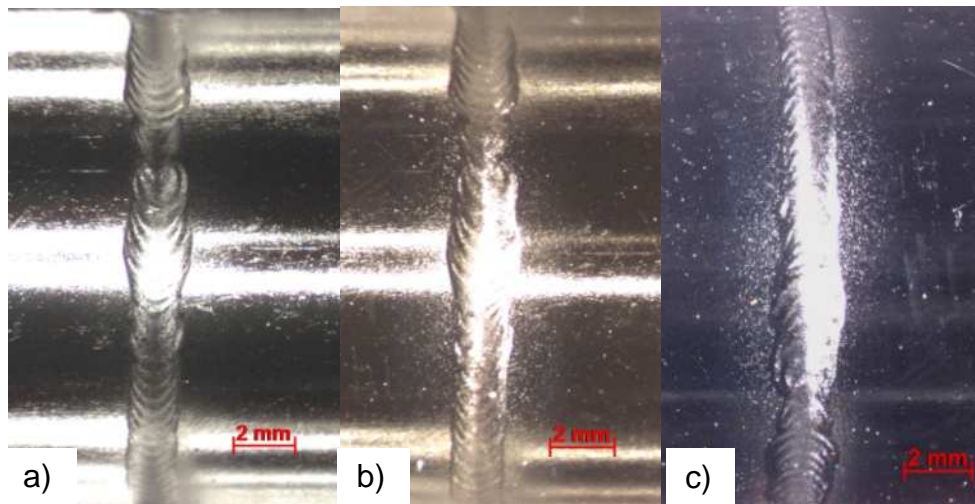
**Abbildung 43:** Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarbenfrei bei einer Feuchtekonzentration von 300 ppm im Wurzelschutzgas bei  $23^\circ\text{C}$ ; a) Lichteinstrahlung  $90^\circ$ ; b) Lichteinstrahlung  $90^\circ+45^\circ$ ; c) Lichteinstrahlung  $45^\circ$

- **Versuchsdurchführung bei -6 °C im Freien**

Die Ergebnisse der Versuche im Freien bei -6 °C zeigen eine deutliche Abweichung gegenüber den Versuchen bei 23 °C. Wie in **Abbildung 44** zu sehen, sind bei diesen Proben auch bei einer Feuchtekonzentration von 240 ppm deutliche Anlauffarben sichtbar. Bei dieser Temperatur sinkt die Feuchtekonzentrationsgrenze für anlauffarbenfreies Schweißen auf 50 ppm. In **Abbildung 45** ist die bei 50 ppm Feuchte und -6 °C geschweißte Probe als Vergleich dargestellt.



**Abbildung 44:** Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarben bei einer Feuchtekonzentration von 240 ppm im Wurzelschutzgas bei -6 °C Umgebungstemperatur; a) Lichteinstrahlung 90°, b) Lichteinstrahlung 90°+45°, c) Lichteinstrahlung 45°



**Abbildung 45:** Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarben bei einer Feuchtekonzentration von 50 ppm im Wurzelschutzgas bei -6 °C Umgebungstemperatur; a) Lichteinstrahlung 90°, b) Lichteinstrahlung 90°+45°, c) Lichteinstrahlung 45°

- **Auswertung der Messbedingungen**

Die Versuche bei 23 °C wurden unter stabilen Bedingungen und besonders bei der Ermittlung des Grenzwertes mit einer ausreichenden Häufigkeit durchgeführt. Die Werte können deshalb als verlässlich angesehen werden.

Bei den Versuchen im Außenbereich bei -6 °C konnten nur wenige Proben geschweißt werden, da die im Schlauch vorhandene Feuchte relativ schnell abnimmt.

Die ermittelten Ergebnisse können deshalb ohne ausreichende Wiederholung nur als Tendenz gewertet werden.

Der Frostpunkt dieser Feuchtekonzentration liegt bei etwa -28 °C<sub>tp</sub>. Ein Ausfrieren des Kondenswassers auf dem Sensor und damit das Auftreten größerer Messfehler ist somit nicht möglich. Wird von einer Unsicherheit von bis zu 4 °C<sub>tp</sub> ausgegangen (vergleiche 5.1.1), ergibt sich eine mögliche Abweichung von bis zu ±100 ppm. Die gemessenen Werte liegen demnach auch bei Annahme des größtmöglichen Fehlers noch um 100 ppm auseinander (Grenzwert bei Raumtemperatur: 300 ppm ±50 ppm; Grenzwert bei -6 °C: 50 ppm ±100 ppm).

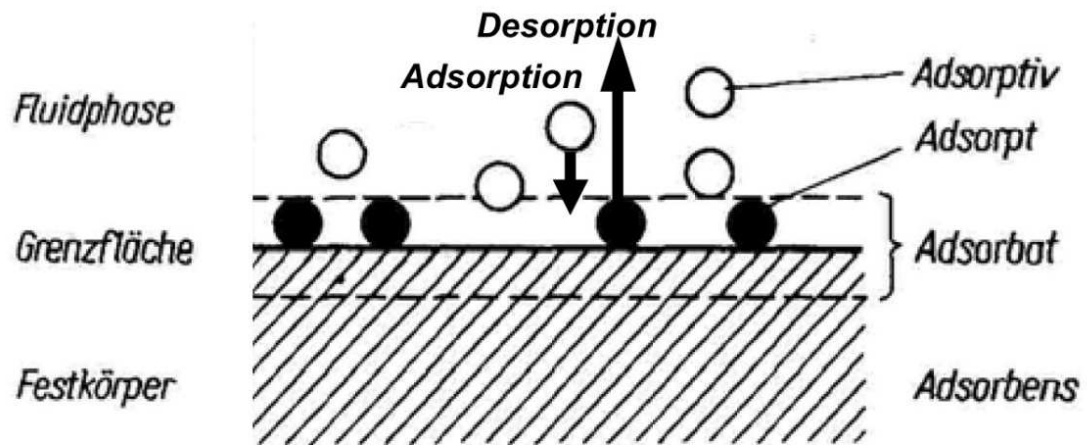
- **Physikalische Erklärung des temperaturabhängigen Grenzwertverhaltens**

Eine mögliche Erklärung für die Temperaturabhängigkeit der feuchtigkeitsinduzierten Anlauffarben bietet die Langmuir-Adsorptionsisotherme (LAI). Sie beschreibt die Anreicherung eines Fluides auf einer Oberfläche in Abhängigkeit von den vorhandenen und bereits belegten Plätzen, dem Partialdruck und der Temperatur. In **Abbildung 46** sind die Elemente des Adsorptionsmodells, samt zugehöriger Fachtermini dargestellt. [53]

Die adsorbierbare Masse, also das Adsorpt, kann mit Gleichung (13) berechnet werden. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und adsorbierbarer Masse  $m_{\infty}$  ist in **Abbildung 47** dargestellt. Bei tieferen Temperaturen sinkt demnach nicht nur der Sättigungsdampfdruck, es steigt auch die Menge an Material, die sich an einer Oberfläche anlagern kann. [53][54]

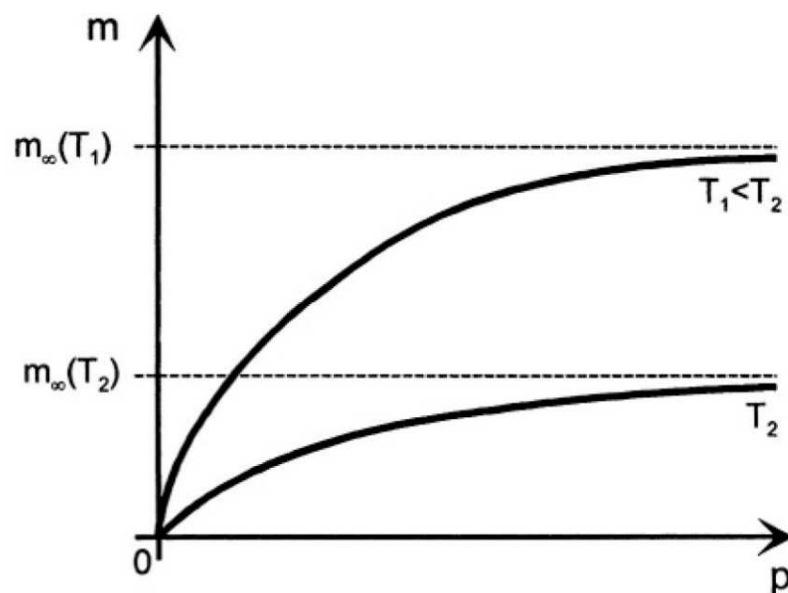
Trotz dieser möglichen physikalischen Erklärung des Phänomens sind weitere Versuchsreihen mit einem an die gewonnenen Erkenntnisse angepassten Versuchsaufbau notwendig.

Hauptmerkmal dieses optimierten Versuchsaufbaus bildet eine konstante Feuchtekonzentration und eine regelbare Kühleinheit zur Festlegung der Wurzelschutzgastemperatur sowie der Probenstücktemperatur.



**Abbildung 46:** Grundbegriffe der Adsorption [54]

$$m(p, T, m^s) = m_{\infty}(T, m^s) \frac{b(T) \cdot p}{1 + b(T) \cdot p} \quad (13)$$



**Abbildung 47:** Langmuir-Adsorptionsisotherme, aufgetragen für zwei unterschiedliche Temperaturen ( $T_1 < T_2$ ) [53]



#### 6.1.4 Schlussfolgerungen für die Anwendung in der Praxis

Die Ergebnisse zur Temperaturabhängigkeit des Schweißprozesses zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Erfahrungen aus der Praxis. Eine Schweißung bei -20 °C ist demnach nur bei Verwendung von ausreichend trockenem Prozess- und Wurzelschutzgas, sowie ausreichenden Wartezeiten zur Trocknung der Oberflächen und Dauerspülung der Lichtbogenkammer möglich. Die genauen Werte sind dabei vom Grad der Kondenswasserbildung abhängig. Die in den Versuchen gewählten Zeiten von bis zu 30 min sind nicht praxistauglich. Zur Sicherstellung ausreichender Wartezeiten bieten sich in diesem Fall Probeschweißungen an zerstörend prüfbaren Rohrproben an.

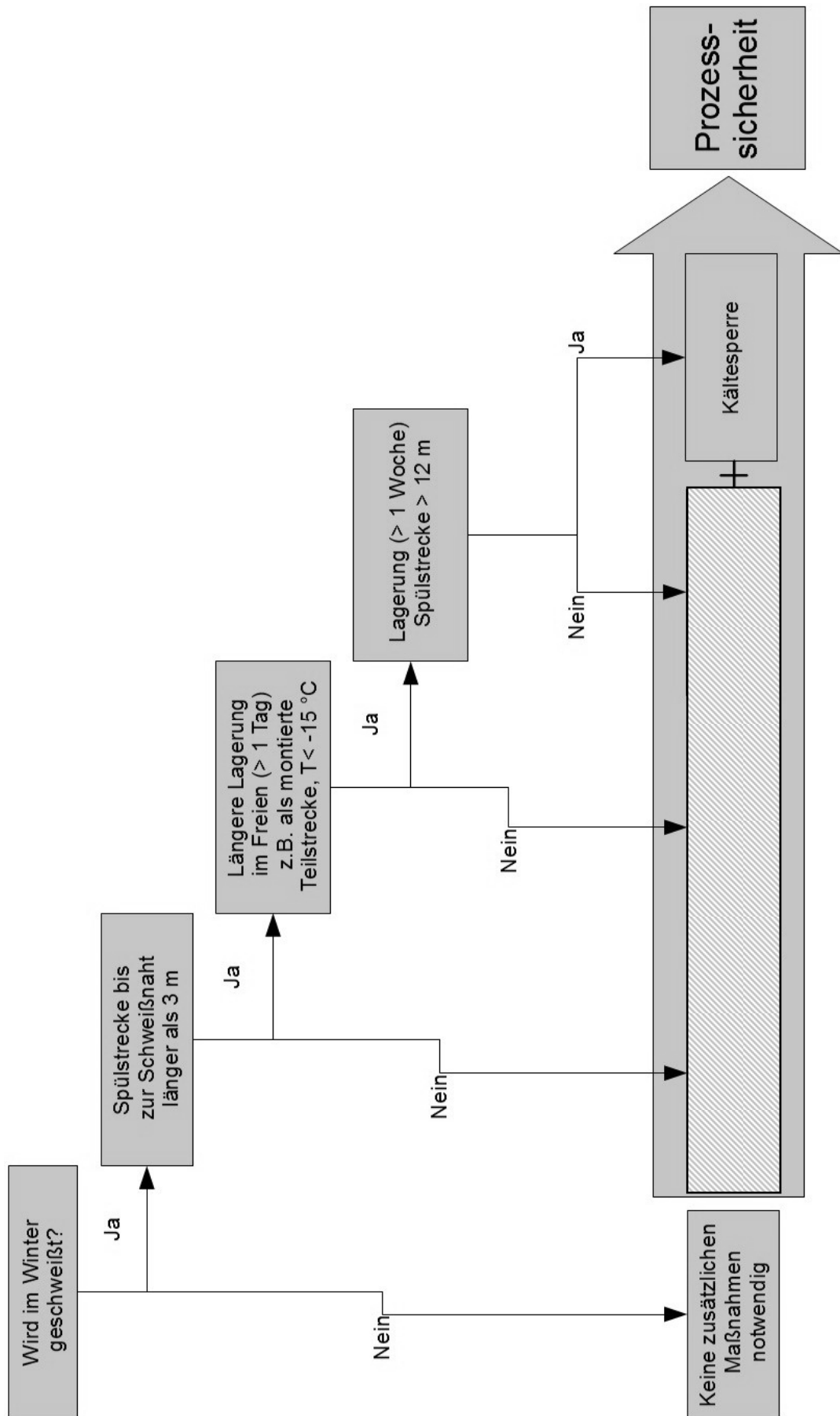
Die durch verstärkte Feuchtigkeitsablagerung bei Temperaturschwankungen ober und unterhalb des Gefrierpunktes verursachte Anreicherung des Wurzelschutzgases ist nur bei bestimmten Rahmenbedingungen die Ursache für Anlauffarben im Rohrinernen. Hierzu zählen vor allem ein sehr langes, der Schweißnaht vorgelagertes, Rohrsegment, welches die Spülstrecke verlängert, lange Lagerzeiten im Freien und tiefe Temperaturen während der Spül- bzw. Trocknungsphase. Diese Kombination tritt in der Praxis relativ selten auf, was das scheinbar sporadische Auftreten des Phänomens erklärt.

Die Ermittlung des Grenzwertes von 300 ppm bei Raumtemperatur (möglicherweise bei tieferen Temperaturen niedriger) bildet den letzten Teil des benötigten Wissens, um die wichtigsten Randbedingungen für Anlauffarbenbildung beim Schweißen unter Winterbedingungen zu benennen, und Gegenmaßnahmen zur Verhinderung einer zu starken Feuchtekonzentration im Prozess- und Wurzelschutzgas auszuarbeiten.

Folgende Randbedingungen sind demnach für Schweißungen im Außenbereich relevant:

1. Feuchtegehalt (und Temperatur) des Wurzelschutzgases
2. Prozessgastemperatur und Feuchtegehalt
3. Lagerdauer der Rohrsegmente und Module im Freien
4. Stärke der Temperaturschwankungen und der relativen Luftfeuchtigkeit während der Lagerdauer
5. Dichtheit der verwendeten Stopfen oder Kappen und der abgeklebten Heftstellen

Eine Übersicht zur Auswahl der benötigten Maßnahmen entsprechend der vorliegenden Randbedingungen ist in **Abbildung 48** dargestellt.



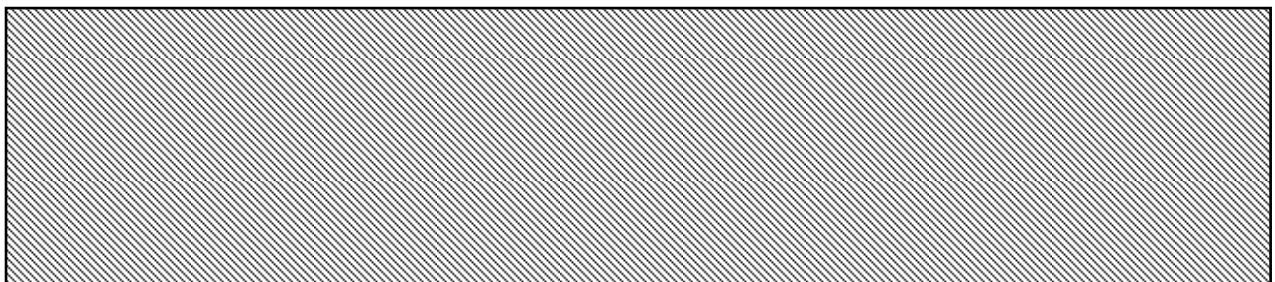
**Abbildung 48:** Rahmenbedingungen und geeignete Maßnahmen für Schweißungen auf Winterbaustellen

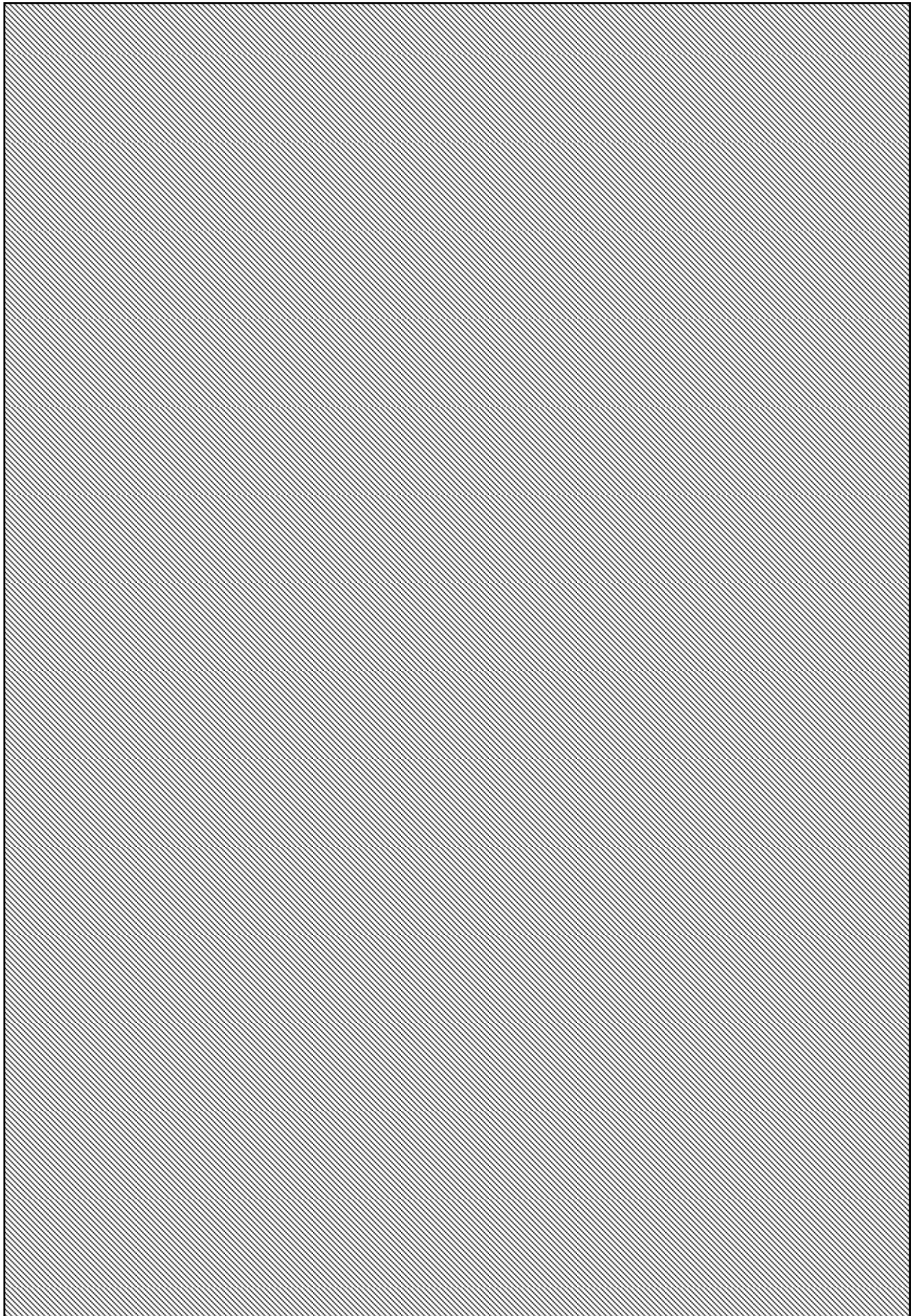


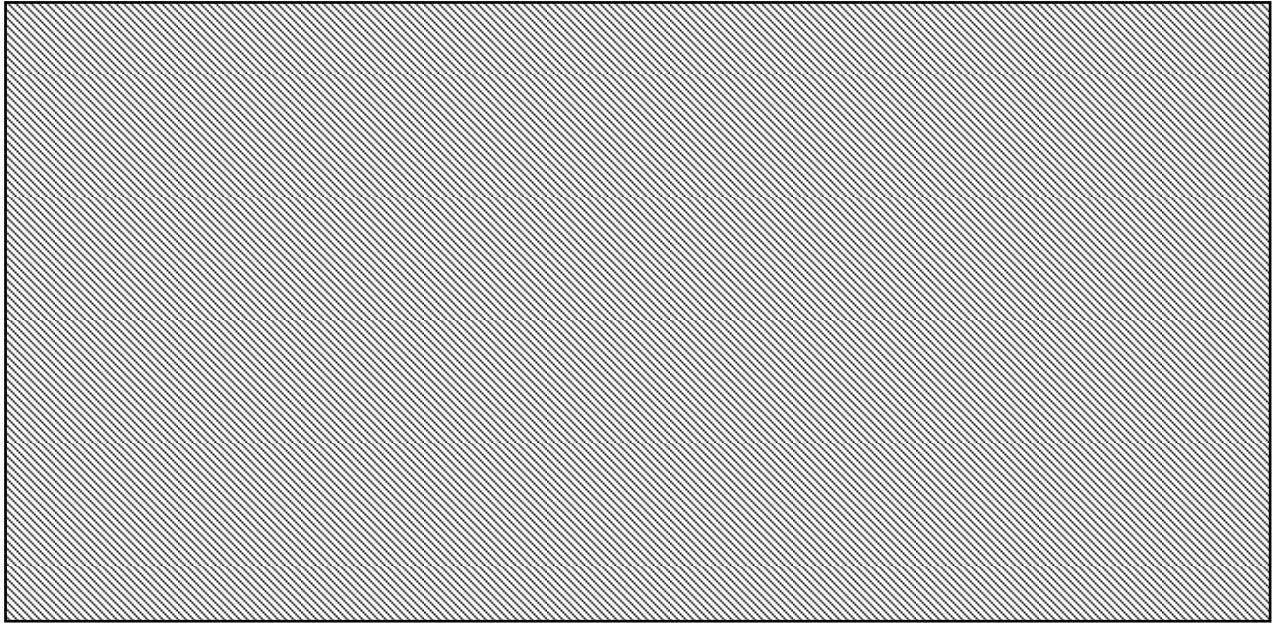


- **Probeschweißung als Indikator**

Unabhängig von sonstigen Messmitteln kann eine Indikation auch mittels einer Probeschweißung erfolgen. Voraussetzung ist lediglich eine Rohrkappe mit Rohrverschraubung zum Anschluss eines Spülschlauches. Das durch das Rohr geleitete Wurzelschutzgas wird somit für eine separate Schweißung an einem kurzen Probestück verwendet. Das Probestück wird nach der Schweißung aufgesägt und einer Sichtprüfung unterzogen. Sind in der WEZ Anlauffarben festzustellen, weiß der Schweißer auch ohne Farbskala, dass entweder länger gespült werden muss, oder weiter Trocknungsmaßnahmen notwendig sind. Eine Farbskala ist allerdings insofern sinnvoll, da die im Rohr vorhandene Feuchtigkeitsmenge eingeschätzt werden kann und die Auswahl von Gegenmaßnahmen zielgerichteter erfolgt.



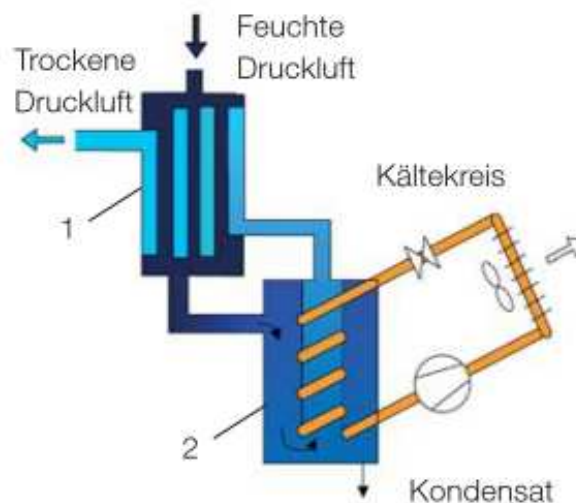




- **Kältesperre**

Die Funktionsweise der Kältesperre orientiert sich an dem Prinzip eines industriellen Kältetrockners, wie er in **Abbildung 52** dargestellt ist. Die Schwierigkeit besteht in dem Erreichen einer Temperatur an der Innenseite des Rohres, die dem Tau- oder Frostpunkt des beabsichtigten Feuchtegehaltes des Wurzelschutzgases entspricht.

Erschwert wird die Umsetzung durch die bereits beschriebenen Baustellenbedingungen.



**Abbildung 52:** Prinzipskizze für die industrielle Gastrocknung [30]

Für eine Feuchtekonzentration unter 300 ppm (Grenze bei 23 °C) ist eine Oberflächentemperatur der Rohrwand unter -32 °C notwendig. Für 50 ppm Restfeuch-

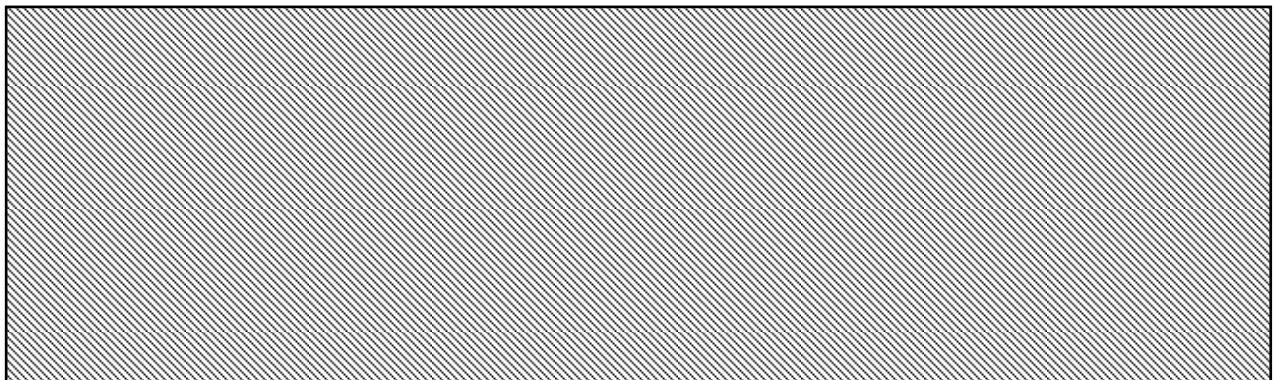
te müssen  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht werden. Die zu kühlende Mindestlänge ist vom Rohrdurchmesser und damit von der Durchflussmenge abhängig.

Eine Lösung bietet die Verwendung von flüssigem Stickstoff. In einem vergleichbaren Aufbau wie bei der oben konzipierten Rohrbegleitheizung, bei dem die Heizelemente allerdings durch Kapillarrohre ersetzt werden, wird der flüssige Stickstoff eingefüllt.

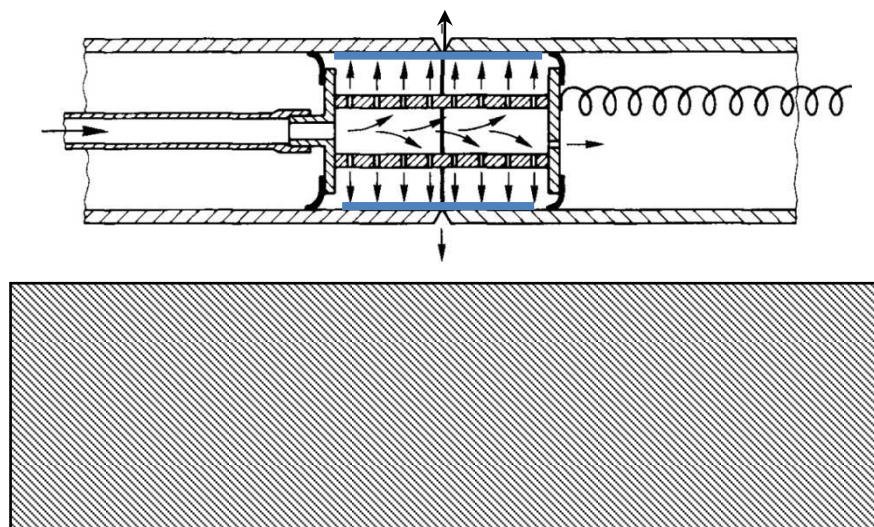
Die Höhe des verwendeten Fallrohres und der dadurch erzeugte Druck müssen allerdings größer sein als der zu überwindende Widerstand in der Leitung selbst. Bis zum Erreichen einer Temperatur von unter  $-97\text{ }^{\circ}\text{C}$  tritt eine sofortige Verdampfung des Stickstoffes auf. Der gasförmige Stickstoff durchströmt das Leitungssystem der Kältesperre und kühlt das umschlossene Rohrmaterial ab. Die verwendeten austenitischen CrNi-Stahlrohre sind für diesen Temperaturbereich geeignet.

Die Erkenntnisse aus den Versuchen liefern auch eine mögliche Lösung für die in Kapitel 4.2 erwähnte Problematik von Anlauffarben in der oberen Halbschale bei Schweißungen von Rohren mit einem Durchmesser  $>3''$ .

Wird von der Prämisse ausgegangen, dass sich im Bereich der Wärmeeinflusszone



Diese Zusammenhänge sind in **Abbildung 53** am Beispiel der Verwendung einer Wurzelschutzkammer dargestellt.



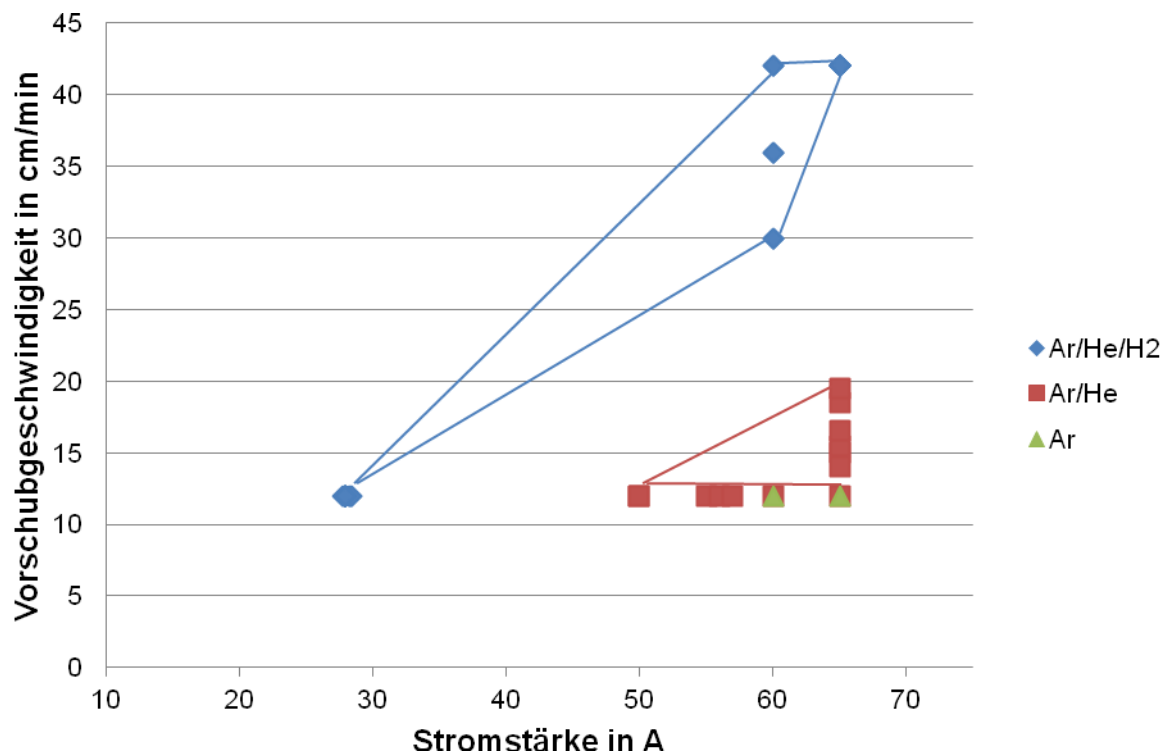
**Abbildung 53:** Zustand Wurzelschutzkammer [24] vor (oben) und während (unten) des Schweißprozesses bei ungenügender Vorwärmung und Spüldauer; Oben: Wasser oder Eisschichten an der Oberfläche;

## 6.2 Einfluss der Prozessgaszusammensetzung beim WIG-Orbitalschweißen

### 6.2.1 Versuchsauswertung

Die verwendeten Gasgemische zeigen die nach [20] zu erwartenden Eigenschaften hinsichtlich der erhöhten Wärmeeinbringung und somit der Steigerung der Schweißgeschwindigkeit.

Für die einzelnen Prozessgase wurde bei den Schweißungen die obere und untere Grenze hinsichtlich der maximal möglichen Vorschubgeschwindigkeit und Stromstärke ausgelotet, bei der ein sicheres Durchschweißen möglich ist. Die Ergebnisse zur Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und Senkung der Stromstärke sind in **Abbildung 54** zu sehen. Eingetragen sind die Ergebnisse der Prozessgase Ar, Ar/He und Ar/He/H<sub>2</sub> für das gepulste WIG-Orbitalschweißen von austenitischen CrNi-Stahlrohren mit einer Wandstärke von 1,65 mm. Die wesentlichen Randbedingungen zur Eingrenzung der Prozessfenster bestehen in einer gleichmäßigen Wurzel Ausbildung mit einem maximalen Wurzeldurchang von 10 %, der Begrenzung der Stromstärke auf maximal 65 A und einer minimalen Vorschubgeschwindigkeit von 12 cm/min. Das in der Praxis verwendete Standardprozessgas Argon dient dabei als Referenz. Im Vergleich zu einem Ar/He- oder Ar/He/H<sub>2</sub>-Gemisch ist die Vorschubgeschwindigkeit des Argons bei den genannten Randbedingungen nicht merklich zu erhöhen.



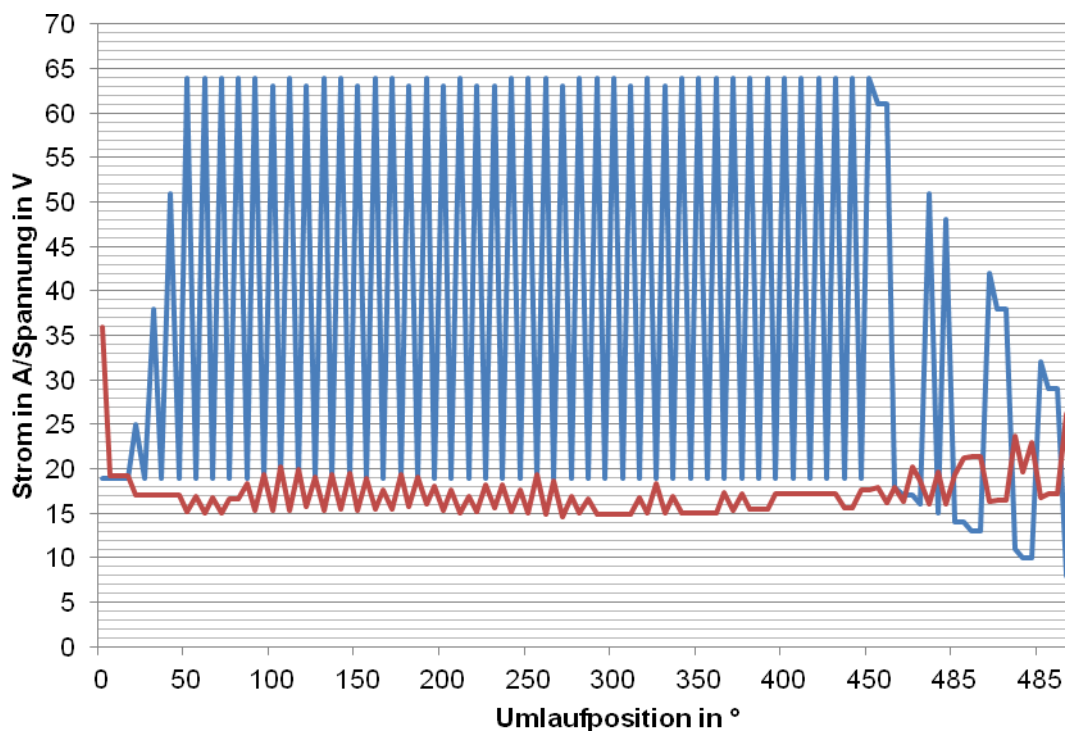
**Abbildung 54:** Vorschubgeschwindigkeiten im Zusammenhang zur verwendeten Stromstärke bei den Gasgemischen Ar, Ar/He und Ar/He/H<sub>2</sub>

Die Versuche mit dem Prozessgas Ar/He zeigen eine deutliche Erweiterung des Prozessfensters gegenüber reinem Argon. Ein weitere signifikante Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit bzw. eine erhebliche Senkung der Stromstärke ist durch die Verwendung des Prozessgases Ar/He/H<sub>2</sub> möglich.

Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Ergebnissen geben die Parameterbereiche für eine Schweißnaht mit vollständiger Wurzelausbildung und einem maximalen Wurzeldurchhang von 10 % an. Durch die lineare Abhängigkeit der eingebrachten Streckenenergie von der Vorschubgeschwindigkeit und der Stromstärke, ist auch in den Bereichen, die nicht von einer Probeschweißung bestätigt sind, von einer sicheren Durchschweißung auszugehen.

- **Auswertung der Streckenenergie**

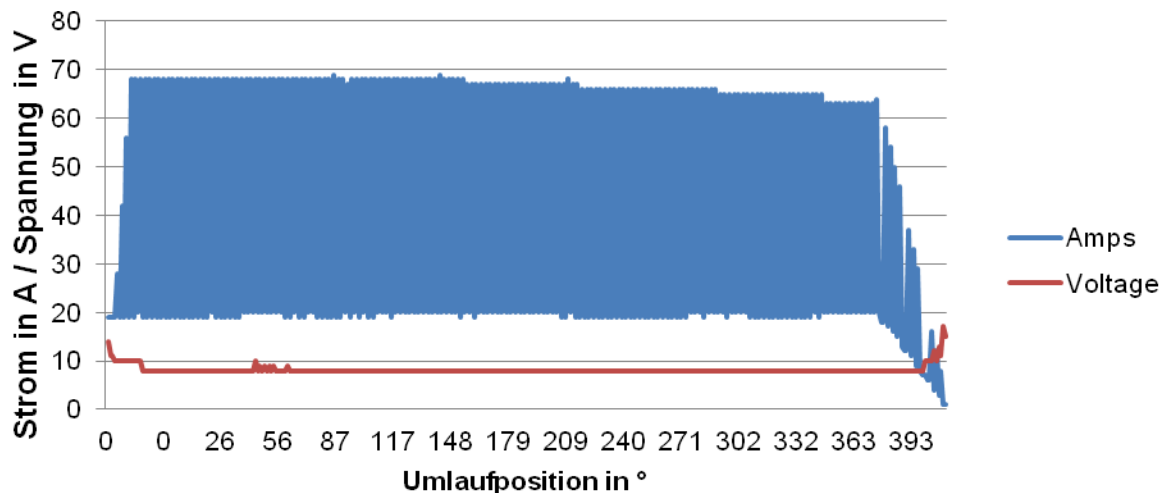
Die Energieeinbringung der getesteten Prozessgase unterscheidet sich aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften und ihrer Wirkung auf den Lichtbogen. In **Abbildung 55** ist der Verlauf der Strompulse sowie der Spannung während der Schweißung für das Prozessgas Ar/He/H<sub>2</sub> abgebildet. Im Vergleich zu einer Schweißung mit reinem Argon zeigt das Dreistoffgemisch hinsichtlich der Stromstärke eine größere Abhängigkeit der Lichtbogenstension. Dabei ist in der Grundstromphase die Spannung mit etwa 18,5 V höher als in der Hochstromphase mit 16,5 V.



**Abbildung 55:** Auszug dem Schweißprotokoll der Schweißung eines 3/4" CrNi-Stahlrohres mit dem Gasgemisch Ar/He/H<sub>2</sub>; I<sub>H</sub>→65 A; I<sub>G</sub>→25 A; U<sub>G</sub>→18,5 V; U<sub>H</sub>→16,5 V; I<sub>P</sub>→0,1 s; v→42 cm/s



In **Abbildung 56** ist der Verlauf der Strompulse sowie der Spannung während der Schweißung für das Prozessgas Ar abgebildet. Durch die längere Schweißzeit ergeben sich deutlich mehr Messwerte über den Rohrumfang. Im Vergleich zu den Mischgasen ist die Spannung über den gesamten Nahtverlauf nahezu konstant bei 8,5 V.



**Abbildung 56:** Auszug dem Schweißprotokoll der Schweißung eines 3/4" CrNi-Stahlrohres mit dem Standardprozessgas Ar;  $I_H \rightarrow 65$  A;  $I_G \rightarrow 25$  A;  $U_G \rightarrow 8,5$  V;  $U_H \rightarrow 8,5$  V;  $I_P \rightarrow 0,1$  s;  $v \rightarrow 12$  cm/s

Zur Berechnung der Streckenenergie wird im Allgemeinen die in Gleichung (14) angegebene Formel verwendet. Für die Berechnung der Streckenenergie für das gepulste WIG-Schweißen muss eine Anpassung hinsichtlich der für die Phasen unterschiedlichen Strom- und Spannungsstärken erfolgen. Die angepasste Formel für diesen Sachverhalt ist in Gleichung (15) angegeben. Der Wirkungsgrad der Einzelnen Prozessgase wird dabei nicht berücksichtigt.

$$E = \frac{U \cdot I}{v} \quad (14)$$

$$E = \frac{U_H \cdot I_H}{2v} + \frac{U_G \cdot I_G}{2v} \quad (15)$$

Mit Hilfe der aufgestellten Gleichung (15) und den Werten aus den Schweißprotokollen für die verschiedenen Prozessgase, wird die Streckenenergie in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit errechnet. Die verwendeten Werte und die Ergebnisse sind in Tabelle 14 aufgeführt. An dieser Übersicht wird ersichtlich, dass die eingebrachte Streckenenergie nicht als alleiniges Merkmal zur Auswahl eines Prozessgases reicht. Argon hat bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 12 cm/min eine Streckenenergie von 2,7 kJ. Das Ar/He/H<sub>2</sub>-Gemisch hat hingegen bei einer Vor-

schubgeschwindigkeit von 42 cm/min eine Streckenenergie von 1,6 kJ, also nur 60 % der Energie des Prozessgases Argon und erreicht dennoch eine sichere Durchschweißung.

**Tabelle 14:** Errechnete Streckenenergie der einzelnen Prozessgase für verschieden Vorschubgeschwindigkeiten

Parameter		Ar	Ar/He	Ar/He/H <sub>2</sub>
Hochstrom in A		65	65	65
Grundstrom in A		25	25	25
Hochstromspannung in V		8,5	10,5	16,5
Grundstromspannung in V		8,5	12,5	18,5
Pulszeiten in s		0,1	0,1	0,1
Streckenenergie $\bar{E}$ in kJ/cm				
Vorschubgeschwindigkeit in cm/min	12	2,7	3,5	5,6
	18	1,8	2,4	3,7
	42	0,8	1,0	1,6

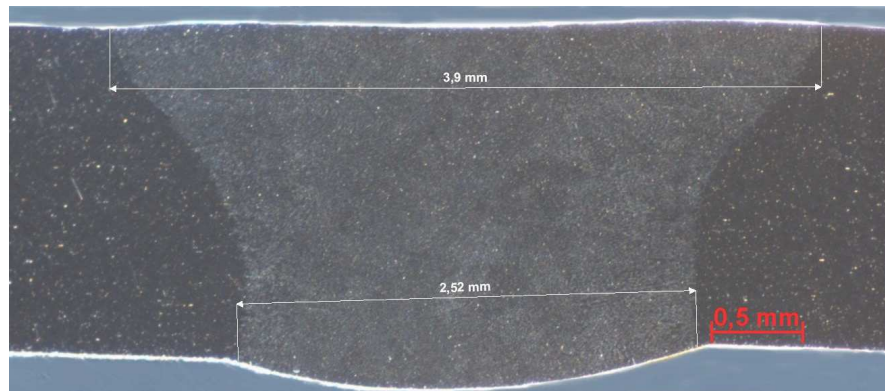
- **Auswertung des Einbrandprofils**

Für die Auswertung der Schweißnahteigenschaften wird für jedes Prozessgas und dessen maximale Vorschubgeschwindigkeit exemplarisch eine Schliffprobe angefertigt. In **Abbildung 57** ist das Einbrandprofil des Prozessgases Argon dargestellt. Dieses Profil wird als Ausgangswert für den Vergleich mit den anderen Gasgemischen verwendet. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt 12 cm/min. Die Schweißnaht hat lichtbogenseitig eine Breite von 3,9 mm und wurzelseitig eine Breite von 2,5 mm.

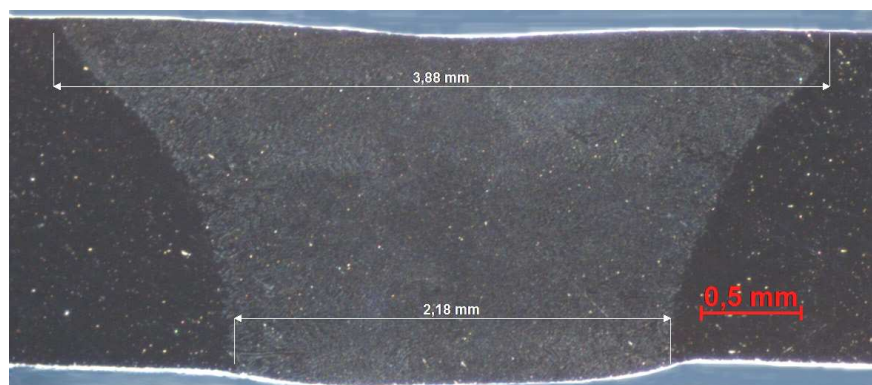
Die **Abbildung 58** zeigt das Einbrandprofil des Ar/He 70/30-Gemisches bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 18,5 cm/min. Die lichtbogenseitige Nahtbreite liegt bei 3,9 mm, die wurzelseitige Nahtbreite bei 2,2 mm. Dies entspricht einem Verhältnis von 1:0,56 (Argon 1:0,64). Der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit um den Faktor 1,5 steht eine Kostensteigerung durch die Verwendung eines Ar/He-Gemisches um den Faktor 6,33 gegenüber.

**Abbildung 59** zeigt das Einbrandprofil des Ar/He/H<sub>2</sub>-20/70/10-Gemisches bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 42 cm/min. Die lichtbogenseitige Nahtbreite liegt bei 2,7 mm, die wurzelseitige Nahtbreite bei 2 mm. Dies entspricht einem Verhältnis von 1:0,74 (Argon 1:0,64). Die Ausbildung der Nahtwurzel zur lichtbogenseitige Nahtbreite fällt deutlich breiter aus als bei der Verwendung von Ar und Ar/He. Jedoch steht der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit um den Faktor 3,5 bei diesem Prozessgas eine Kostensteigerung für das Prozessgas um den Faktor 7,5 gegenüber. Neben einer im direkten Vergleich schmaler werdenden Schweißnaht, ändert sich bei dem Prozessgas Ar/He/H<sub>2</sub> bedingt durch die höhere Vorschubgeschwindigkeit auch

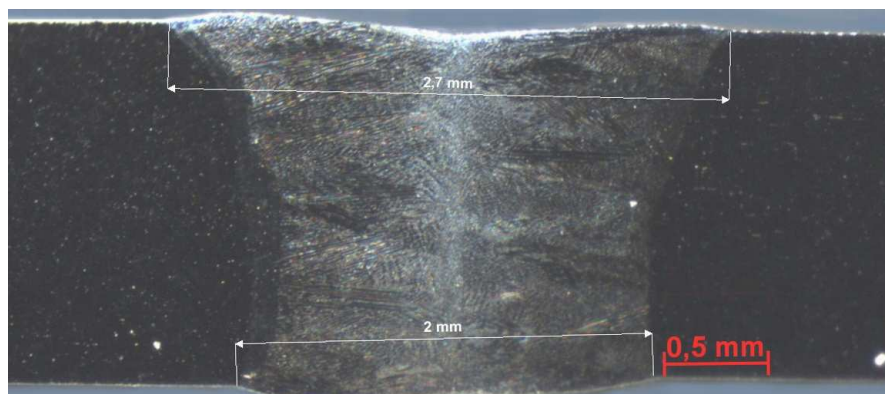
die Gefügestruktur. Dies ist auf die höhere Abkühlgeschwindigkeit zurückzuführen [10]. Die vermutete, damit einhergehende Steigerung des  $\delta$ -Ferritanteils kann aus Mangel eines entsprechenden Messgeräts bis zum Ende der Arbeit nicht überprüft werden.



**Abbildung 57:** Schweißnaht, Querschliff, Ar bei 12 cm/min und 65 A Hochstrom; 1,4 mm Lichtbogenlänge; bei einer Spannung von 8,5 V (Hochstromphase)



**Abbildung 58:** Schweißnaht, Querschliff, Ar/He Gemisch bei 18,5 cm/min und 65 A Hochstrom; 1,4 mm Lichtbogenlänge; bei einer Spannung von 12,5 V (Hochstromphase)



**Abbildung 59:** Schweißnaht, Querschliff Ar/He/H<sub>2</sub> Gemisch bei 42 cm/min und 65 A Hochstrom; 1,4 mm Lichtbogenlänge; bei einer Spannung von 16,5 V (Hochstromphase)

- **Überprüfung der Legierungszusammensetzung**

Die bei den Versuchen beobachtet Rußbildung lässt die Vermutung zu, das bei der Verwendung des Ar/He/H<sub>2</sub>-Gemisches während der Schweißung verstärkt Oxidationsprozesse stattfinden, was zu einer Verringerung der Legierungselementen im Schweißgut und der WEZ führen würde. Um die Stärke des möglichen Verlustes zu bestimmen, werden jeweils drei EDX-Punktskans im Schweißgut sowie als Vergleich im Grundwerkstoff durchgeführt. Zusätzlich wird ein EDX-Linienscan von der Schweißnahtmitte bis in den Grundwerkstoff durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang (Anlage 12; Anlage 13; Anlage 14) hinterlegt.

Aus den Scans geht hervor, dass sofern es zu einer Verringerung der wichtigsten Legierungselemente Chrom, Nickel und Molybden kommt, diese unterhalb der Auflösungsgrenze bzw. im Bereich der Messunsicherheit liegt. Eine Änderung der Eigenschaften des Schweißgutes durch eine Änderung der Legierungszusammensetzung ist demnach nicht zu befürchten.

- **Vorteile des Dreistoffgemisches Ar/He/H<sub>2</sub>**

Einen weiteren Vorteil hinsichtlich der Durchschweißbarkeit, bildet neben der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit, das erweiterte Prozessfenster und die damit verbundenen Vorteile bezüglich Wärmeeinbringung und Staudruck des Dreistoffgemisches. Die von Charge zu Charge unterschiedliche Konzentration von Legierungselementen z. B. Schwefel kann bei starken Unterschieden der Fügepartner zu Unregelmäßigkeiten führen. Meist ist die Naht nicht durchgeschweißt, was in vielen Fällen inakzeptabel ist. Es ist zu vermuten, dass die Erhöhung der Wärmeeinbringung durch die Zumischung von Helium und Wasserstoff die durch unterschiedliche Legierungskonzentrationen verursachten Effekte in der Fügezone reduzieren. [1][20]

- **Nachteile des Dreistoffgemisches Ar/He/H<sub>2</sub>**

Neben den positiven Effekten sind bei den Versuchen auch Nachteile des Ar/He/H<sub>2</sub>-Gemisches ersichtlich geworden. Zum einen sind dessen physikalischen Eigenschaften durch die Zumischung von Helium und Wasserstoff gegenüber Argon stark verändert. Die Dichte des Gesamtgemisches wird reduziert, wodurch es leichter ist als Luft. Die verwendete Gerätetechnik, insbesondere der verwendete Schweißkopf, ist für Argon ausgelegt, welches schwerer als Luft ist. Die Folge sind bei der Verwendung des Dreistoffgemisches Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht durch einströmende Umgebungsluft.

Zum anderen ist die Rußbildung in der Lichtbogenkammer ein deutliches Problem. Sie wird vermutlich durch die reduzierende Gaskomponente hervorgerufen. Der sich absetzende Ruß erhöht den Übergangswiderstand zwischen den Schleifkontakten im

Schweißkopf, wodurch die an der Elektrode anliegende Spannung abfällt und Fehlzündungen des Lichtbogens begünstigt werden.

### 6.2.2 Anwendung des Mischgases Ar/He/H<sub>2</sub> in der Praxis

Die mit dem Dreistoffgemisch erzielte Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit bedeutet nur einen sehr kleinen Vorteil für den Einsatz in der Praxis im betrachteten Anwendungsgebiet kleiner Rohrdurchmesser mit geringen Wandstärken. Der Grund liegt hauptsächlich im geringen Zeitanteil, den der Schweißprozess beim Herstellen einer solchen Rohr-Rohr-Verbindung einnimmt. Die Schweißzeit einer 3/4" Rohr-Rohr-Verbindung mit der Wandstärke 1,65 mm beträgt etwa 30 s. Die Zeit zum Ablängen, Planen, Entgraten, Biegen, Reinigen und gegebenenfalls Heften, beträgt hingegen zwischen 5 und 30 min. Eine Verkürzung der Schweißzeit würde sich also nur marginal auf die Gesamtarbeitszeit auswirken. Dem gegenüber stehen die gesteigerten Kosten hinsichtlich des Gasgemisches selbst (ca. Faktor 7,5 gegenüber Argon 5.0), der konstruktiven Änderung am Schweißkopf und der durch die Rußbildung verursachten Erhöhungen des Reinigungsintervalls. Hinzu kommen noch Kosten für Schulungsmaßnahmen der Anlagenbediener.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hauptursache für die auf Winterbaustellen sporadisch auftretenden Anlauffarben ist eine erhöhte Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas. Die erarbeiteten und zum größten Teil durch Versuche bestätigten Zusammenhänge zwischen Feuchteansammlung bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt und der Ausbildung von Anlauffarben erklären auch das seltene, scheinbar zufällige Auftreten der Unregelmäßigkeit. Durch die Erarbeitung dieser Grundlagen ist eine zielgerichtete Auswahl der Maßnahmen zur Verhinderung von Anlauffarben möglich und somit auch im Einzelfall eine Kosteneinsparung.

Die in den Versuchen aufgetretene Abhängigkeit des Grenzwertes des anlauffarbfreien Schweißens, von der Umgebungs- bzw. Wurzelschutzgastemperatur bedarf einer ausführlicheren Untersuchung. Die für Feuchtigkeit festgestellten Grenzwertänderungen müssen auch bei Anlauffarben messbar sein, die durch molekularen Sauerstoff verursacht werden (vergleiche Anlage 15).

Ungeachtet der möglichen Temperaturabhängigkeit bildet der gefundene Grenzwert für die Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas von 300 ppm bei 23 °C eine wichtige Information für den Wurzelschutz bei hochlegierten Stählen und sauerstoffempfindlichen Metallen.

Die Eignung des Gasgemisches Ar/He/H<sub>2</sub> 20/70/10 für das gepulste WIG-Orbitalschweißen im Dünnblechbereich konnte nur bedingt nachgewiesen werden. Der Hauptgrund liegt in der Kostensteigerung für die Verwendung des Gasgemisches gegenüber gewöhnlichem Wurzelschutzgas um den Faktor 7,5. Auch durch die Kostensenkung durch Erhöhen der Schweißgeschwindigkeit können diese Mehrkosten beim Schweißen dünnwandiger CrNi-Stahlrohren nicht ausgeglichen werden. Die vorausgesagten Eigenschaften hinsichtlich Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit wurden hingegen vollends erfüllt. So konnte in den durchgeführten Versuchen eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit von 12 cm/min bei Argon auf 42 cm/min Ar/He/H<sub>2</sub> erreicht werden. Dies entspricht einer Steigerung um den Faktor 3,5.



## 8 Quellenverzeichnis

- [1] Lucas, W.: TIG and Plasma Welding; Abington Publishing; Cambridge 1990; Woddhaed Publishing Ltd, Abington Hall, Abington; ISBN 1 85573 005 7
- [2] Sende, M.: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Prozessgaszusammensetzung auf die Lichtbogeneigenschaften; Dresden; TU-Dresden; Großer Beleg; 2010
- [3] Thurner S.: Erzeugung und Anwendung modulierter Prozessgasströme beim Schutzgasschweißen; Februar 2008
- [4] Vanschen, W.: Nahtvorbereitung, Schweißparameter und Schutzgase für das WIG-Orbitalschweißen; In: Bänder Bleche Rohre 4 (1996) S. 32-39
- [5] Lehrunterlagen "SFI-Aktuell 2010"  
GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Duisburg 2010
- [6] Hans J. Fahrenwaldt | Volkmar Schulter: Praxiswissen Schweißtechnik; Werkstoffe, Prozesse, Fertigung; 3. aktualisierte Auflage; Vieweg+Teubener; Wiesbaden 2009
- [7] Zähr, J., Schnick, M., Hertel, M., Lohse, M., Sende, M., Füssel, U.; Numerical and experimental studies of the influence of process gases in TIG welding; 63<sup>rd</sup> Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding Commission XII ARC Welding Process and Production Systems; 07.2010, Istanbul, Turkey
- [8] Münter M.: Struktur und Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle nach einer chemisch-thermischen Behandlung bei tiefen Temperaturen; Freiberg; TU-Bergakademie Freiberg; Dissertation; 11.2009 Quelle: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa-27260>
- [9] Schuster, J.: Rost-, säure- und hitzebeständige Stähle – Geschichte, Entwicklung und schweißtechnische Verarbeitung; 6. Chemnitzer Symposium Fügetechnik/Schweißtechnik <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:ch1-200500246>; 05.2004
- [10] Schulze G.: Die Metallurgie des Schweißens; Eisenwerkstoffe – Nichteisenmetallische Werkstoffe; 4., neu bearbeitete Auflage; Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; ISBN 978-3-642-03182-3
- [11] DIN EN ISO 6520-1:2007; Schweißen und Verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an Metallischen Werkstoffen; Teil 1

- Schmelzschweißen; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
- [12] DIN EN 12502-4: 2004; Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe- Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und –speichersystemen – Teil 4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
  - [13] DIN EN ISO 5817: 2006; Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
  - [14] Henkel; Henkel G., Henkel B.: Hinweise zur Bildung, Entstehung und Wirkung von  $\delta$ (Delta)-Ferrit in austenitischen Edelstahllegierungen; Aufsatz Nr. 32 / Rev. 00; 2010
  - [15] Dr.-Ing. H. Köstermann, Dr.-Ing. Helmut Wohlfahrt; SLV Hannover/TU-Braunschweig AiF 11.381 N/1 Abschlussbereich; Schweißbedingte Anlauf-farben- müssen grundsätzlich blanke Nähte gefordert werden? Abschätzung des korrosiven Einflusses von gelben Anlauf-farben auf geschweißte CrNi(Mo)-Stähle; Braunschweig und Hannover, 26.01.2001
  - [16] FprEN ISO 4063: 2010; Schweißen und Verwandte Prozesse - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern (ISO 4063:2009, Korrigierte Fassung 2009-11-15); DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
  - [17] EN ISO 4063: 2000; Schweißen und Verwandte Prozesse - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
  - [18] Schellhase M.: Der Schweißlichtbogen - ein technologisches Werkzeug; 1. Auflage; Verlag Technik, Berlin, 1985; Bestellnummer: 5534196;
  - [19] DIN EN ISO 14175: 2008; Schweißzusätze – Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
  - [20] Zähr, J., Schnick, M., Hertel, M., Lohse, M., Sende, M., Füßel, U. Technische Universität Dresden: IGF-Nr.: 15.774 BR 1 Abschlussbericht;; Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung; Dresden 31.08.2010

- [21] Amman/SDS: Schutzgasschweißen und Formieren von Hochlegierten Werkstoffen; Landau/Isar; 2004; Kosten senken beim Schweißen und Schneiden"
- [22] Aichele, G.; Das Schutzgas macht den Unterschied; In: Verbindungstechnik 2003; Nr.: 12-2003, Seite 14-18
- [23] DVS Bericht 267; Anlauffarben im Bauwesen – immer wieder strittig; DVS – Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren E.V.; DVS Verlag GmbH
- [24] DVS Merkblatt 0937: 2001 Wurzelschutz beim Schutzgasschweißen; DVS – Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren E.V.; DVS Verlag GmbH
- [25] Messer Fachbroschüre: Die richtige Wahl für Formierarbeiten; [http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Schweissen\\_und\\_Schneiden/Formieren.pdf](http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Schweissen_und_Schneiden/Formieren.pdf); 19.03.2011
- [26] ARC MACHINES, GmbH; Thomas Kopitzke: Anlauffarben und deren Entfernung; Finsterwalde 04.2010
- [27] ORBITEC GmbH: Bedienungsanleitung Restsauerstoffmeßgerät „Oxy-2“
- [28] Quelle: [server.fbt.tu-berlin.de/\\*lichtbogencluster\\*/downloads/workshop\\_b/a3.pps](http://server.fbt.tu-berlin.de/*lichtbogencluster*/downloads/workshop_b/a3.pps); 23.04.2011
- [29] HYGROSENS INSTRUMENTS: Grundlagen der Drucktaupunkt-Messtechnik
- [30] TESTO GmbH: Stationäre Messtechnik- Druckluft; II/2008
- [31] TU-Dresden: Technische Thermodynamik/Energielehre; Formelsammlung; 5. Auflage, Wintersemester 2005/06
- [32] Air Liquide Deutschland GmbH; 1 x 1 der Gase, Physikalische Daten für Wissenschaft und Praxis; 1. Auflage, Düsseldorf: Karten Druck & Verlag GmbH, Mönchengladbach, 2005
- [33] Euro-Inox: Beizen und Passivieren nichtrostender Stähle; [http://www.euro-inox.org/pdf/map/Passivating\\_Pickling\\_DE.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/Passivating_Pickling_DE.pdf) 23.03.2011
- [34] Tamman, G., K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen; Über Anlauffarben von Metallen: 1920
- [35] INTEGA GmbH; Standort Dresden; Vermeidung von Anlauffarben beim WIG Orbitalschweißen in der Halbleiter und Pharmaindustrie: 12.2010
- [36] Quelle: [http://osram.de/osram\\_de/Tools\\_%26\\_Services/Training\\_%26\\_Wissen/Webbased\\_Training/ptp\\_de/PTP\\_Popup.jsp](http://osram.de/osram_de/Tools_%26_Services/Training_%26_Wissen/Webbased_Training/ptp_de/PTP_Popup.jsp); 29.03.2011
- [37] Quelle: <http://www.leuchtmittel-ratgeber.de/farbtemperatur-lichtfarbe.php>; 30.03.2011

- [38] DIN EN 12464-1: 2002 Beleuchtung von Arbeitsstätten Teile1 Arbeitsstätten im Innenbereich; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
- [39] DIN EN 12464-2: 2007 Beleuchtung von Arbeitsstätten Teile2 Arbeitsplätze im Freien; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH
- [40] Quelle: <http://www.leuchtmittel-ratgeber.de/leuchtstoffroehren-leuchtstofflampen.php>: 29.03.2011
- [41] Quelle: [http://www.osram.ch/osram\\_ch/DE/Professional\\_Produnkte/Allgemeinbeleuchtung/Kompaktleuchtstofflampen/Warum\\_Kompaktleuchtstofflampen/Fuer\\_jeden\\_Einsatz\\_die\\_richtige\\_Kompaktleuchtstofflampe/103W002DE\\_Lichtfarben.pdf](http://www.osram.ch/osram_ch/DE/Professional_Produnkte/Allgemeinbeleuchtung/Kompaktleuchtstofflampen/Warum_Kompaktleuchtstofflampen/Fuer_jeden_Einsatz_die_richtige_Kompaktleuchtstofflampe/103W002DE_Lichtfarben.pdf): 29.03.2011
- [42] Quelle: Google Earth: Bildaufnahmedatum: 23.02.2003
- [43] ARC MACHINES, INC; Modell 307 WIG-Orbitalschweißstromquelle: Datenblatt 01.2011
- [44] Quelle: [http://tu-resden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_maschinenwesen/iof/lot/ausstattung/klebtechnikum/alterungstest\\_u\\_simulation/klimapruefschrank](http://tu-resden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/iof/lot/ausstattung/klebtechnikum/alterungstest_u_simulation/klimapruefschrank); 05.02.2011
- [45] ARC MACHINES, GmbH; Model 9-750 WATER COOLED WELD HEAD; ILLUSTRATED PARTS BREAKDOWN MANUAL; Rev. B; 01.2010
- [46] JA<sup>2</sup> Instruments; Bedienungsanleitung Restsauerstoffmessgerät 4115 B
- [47] Modell PM 880, Portabele Hygrometer, User's Manual; GE Infrastructure Sensing; Februar 2005
- [48] ABB; Stahlschlüssel-Taschenbuch; Wissenswertes über Stähle; 20. Auflage; Marbach 2004; Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH; ISBN 3-922 599- 19-2
- [49] Strassburg, F. W.; Schweißen nichtrostender Stähle; Düsseldorf 1982; DVS – Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren E.V.; DVS Verlag GmbH; ISBN 3 87155 070 1
- [50] ARC MACHIES, GmbH; Modell 207 WIG-Orbitalschweißstromquelle; Bedienungsanleitung/Schulungshandbuch; 30.10.2007
- [51] Quelle: [http://www.tf.uni-kiel.de/cma/html/rem\\_edx.html](http://www.tf.uni-kiel.de/cma/html/rem_edx.html): 20.04.2011
- [52] Quelle: <http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/Praktikumsbericht/main.htm>: 20.04.2011

- [53] Keller, J., Staudt, R.: GAS ADSORPTION EQUILIBRIA, Experimental Methods and Adsorption Isotherms; New York 2005: Springer Science+Business Media, Inc.; ISBN 0-387-23597-3
- [54] Quelle: <http://www.gmehling.chemie.uni-oldenburg.de/Praktikum/Adsorption.pdf>: 04.2011
- [55] Quelle: <http://www.trockenmittel-shop.de/shop/cgi-bin/shop.dll?SESSIONID=0000829068245366216&AnbieterID=34>: 23.04.2011

## 9 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: Schematische Darstellung des Stromverlaufs beim gepulsten WIG-Schweißen [3] $I_G$ - Grundstrom; $I_P$ - Pulsstrom/Hochstrom; $t_G$ - Pulsdauer der Grundstromphase; $t_P$ - Pulsdauer der Hochstromphase; rechts: Erscheinungsbild einer gepulsten WIG-Schweißnaht [1].....	3
Abbildung 2: gepulste WIG-Schweißung zwischen 0,1 mm dickem, hochlegiertem Stahl und 1 mm dickem Baustahl [1].....	4
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Pulsdauer, Hochstromstärke und Vorschubgeschwindigkeit beim gepulsten WIG-Schweißen [1].....	5
Abbildung 4: Orbitalschweißanlage mit eingespanntem Rohr [5].....	6
Abbildung 5: Schweißzangen für unterschiedliche Rohrdurchmesser [5].....	6
Abbildung 6: Schaeffler-Diagramm [8] [10].....	8
Abbildung 7: Konzentrationsschnitt im Dreistoff-Schaubild Fe-Cr-Ni bei 70 % Fe [10][5] .....	9
Abbildung 8: De Long Diagramm mit eingetragenem Toleranzfeld für den Werkstoff X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) [10] .....	10
Abbildung 9: ZTU-Schaubild für den 1.4462 [10].....	11
Abbildung 10: Ausbildung von Anlauffarben in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration bei gleichen Temperaturregimen; Sauerstoffkonzentrationen: 1→10 ppm; 2→25 ppm; 3→50 ppm; 4→100 ppm; 5→200 ppm; 6→500 ppm; 7→1000 ppm; 8→5000 ppm; 9→12500 ppm; 10→25000 ppm [35].....	14
Abbildung 11: Beispielbilder für: a) Anlauffarben durch Sauerstoff (ca. 12000 ppm) an einem elektropolierten CrNi-Stahlrohr (Mittenrauheit $\leq 0,25 \mu\text{m}$ ); b) anlauffarbenfreie Nahtwurzel eines elektropolierten CrNi-Stahlrohres; c) Rohroberfläche eines CrNi-Stahlrohres; d) Anlauffarben durch Sauerstoff (ca. 12000 ppm) auf Rohroberfläche (Mittenrauheit $\leq 1 \mu\text{m}$ ) .....	14
Abbildung 12: Lochfraßpotenzial im Verhältnis zur Bildungstemperatur der Anlauffarben und der möglichen Schichtdicke [21] [23].....	16
Abbildung 13: Ausprägung einer Lochkorrosion am Beispiel des Werkstoffes X5CrNi18-10 [5].....	17
Abbildung 14: Einbrandprofile handelsüblicher Gase und Gasgemische; WIG-Schweißen, 5 mm Blechdicke, 130 A, Lichtbogenlänge 4 mm, Schweißgeschwindigkeit 15 cm/min [5].....	20
Abbildung 15: Prinzip Wurzelschutz bei Blechen und Rohren [24][21].....	22
Abbildung 16: Aufbau einer Lambdasonde zur Sauerstoffkonzentrationsmessung [28] .....	24



Abbildung 17: Wassergehalt in Luft, abhängig von Temperatur und Druck [30].....	26
Abbildung 18: Aufbau Feuchte-Polymer-Sensor; 1 feuchtedurchlässige Elektrode, 2 dielektrisches Polymer, 3 untere Elektrode, 4 Träger aus Keramiksubstrat, 5 Anschlüsse [30] .....	27
Abbildung 19: Reduzierung der Schutzstufen im Laufe des Fertigungsprozesses....	30
Abbildung 20: Schweißnahtunregelmäßigkeit: partielle Anlauffarben im oberen Bereich .....	32
Abbildung 21: Schweißnahtunregelmäßigkeit: Schweißnahtmittenabweichung.....	32
Abbildung 22: Schweißstromquelle ARC M307 (links) ARC M307 mit Kühlereinheit (rechts) [43] .....	36
Abbildung 23: ARC M9-750 Schweißkopf [45] .....	37
Abbildung 24: Klimaprüfschrank WK 11 - 600/40 [44] .....	38
Abbildung 25: AERO2_MAT 4115 mit Zuleitung und Partikelfilter [46].....	40
Abbildung 26: Restfeuchtemessgerät mit Drucktaupunktsensor PM 880 [47] .....	41
Abbildung 27: MSI Probe Drucktaupunktsensor von GE Panametrics [47].....	41
Abbildung 28: Rasterelektronenstrahlmikroskopaufnahme der Oberfläche eines CrNi-Stahlrohres .....	45
Abbildung 29: Darstellung einer ohne Wurzelschutzgas geschweißten Probe (CrNi-Stahlrohr); a) Rasterelektronenstrahlmikroskopaufnahme; b) Auflichtmikroskopaufnahme .....	46
Abbildung 30: Temperaturverlauf der Trocknungsphase sowie Abkühlphase und Prozessbereich.....	48
Abbildung 31: Versuchsaufbau konstante und wechselnde Temperaturen.....	49
Abbildung 32: Versuchsaufbau Feuchtemessung .....	51
Abbildung 33: Konzentrationsverlauf in der Befeuchtungskammer .....	52
Abbildung 34: Versuchsaufbau Bildung von Anlauffarben bei unterschiedlichen Feuchtekonzentrationen im Wurzelschutzgas .....	53
Abbildung 35: elektropolierte Oberfläche; CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ a) Lichtquelle 90° zum Probestisch b) zwei Lichtquellen Quelle 1: 90° Quelle 2: 45° zum Probestisch .....	56
Abbildung 36: elektropolierte Oberfläche, CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ a) Lichtquelle 90° zum Probestisch b) zwei Lichtquellen Quelle 1: 90° Quelle 2: 45° zum Probestisch .....	58
Abbildung 37: elektropolierte Oberfläche, CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ; Schweißnahtunregelmäßigkeiten: Verfärbungen neben der Schweißnaht; Lichtquelle 45° zum Probestisch .....	58
Abbildung 38: elektropolierte Oberfläche; CrNi-Stahlrohr mit Schweißnahtwurzel und WEZ; Schweißnahtunregelmäßigkeiten: Verfärbungen neben der Schweißnaht; Lichtquelle 45° zum Probestisch .....	59

Abbildung 39: EDX-Linienscan einer Probe mit durch erhöhte Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas (ca 450-500 ppm) verursachten Anlauffarben; Cr: rot, Fe: grau, Mn: blau, Ni: schwarz, O: gelb.....	60
Abbildung 40: EDX-Linienscan einer Probe mit durch molekularen Sauerstoff in hoher Konzentration (Umgebungsluft) verursachten Anlauffarben; Cr: rot, Fe: grau, Mn: blau, Ni: schwarz, O: gelb.....	61
Abbildung 41: Konzentrationsverlauf; Probe mit Wasser befeuchtet (blau); Probe trocken (rot) Durchflussmenge 2 l/min.....	62
Abbildung 42: Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarben bei einer Feuchtekonzentration von 1200 ppm im Wurzelschutzgas bei 23 °C Raumtemperatur; a) Lichteinstrahlung 90°, b) Lichteinstrahlung 90°+45°, c) Lichteinstrahlung 45°.....	64
Abbildung 43: Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarbenfrei bei einer Feuchtekonzentration von 300 ppm im Wurzelschutzgas bei 23 °C; a) Lichteinstrahlung 90°, b) Lichteinstrahlung 90°+45° ; c) Lichteinstrahlung 45°.....	64
Abbildung 44: Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarben bei einer Feuchtekonzentration von 240 ppm im Wurzelschutzgas bei -6 °C Umgebungstemperatur; a) Lichteinstrahlung 90°, b) Lichteinstrahlung 90°+45°, c) Lichteinstrahlung 45°.....	65
Abbildung 45: Elektropoliertes CrNi-Stahlrohr; Anlauffarben bei einer Feuchtekonzentration von 300 ppm im Wurzelschutzgas bei -6 °C Umgebungstemperatur; a) Lichteinstrahlung 90°, b) Lichteinstrahlung 90°+45°, c) Lichteinstrahlung 45°.....	65
Abbildung 46: Grundbegriffe der Adsorption [54] .....	67
Abbildung 47: Langmuir-Adsorptionsisotherme, aufgetragen für zwei unterschiedliche Temperaturen ( $T_1 < T_2$ ) [53] .....	67
Abbildung 48: Rahmenbedingungen und geeignete Maßnahmen für Schweißungen auf Winterbaustellen.....	69
Abbildung 49: Silikagel im ungesättigten und gesättigten Zustand [55].....	70
Abbildung 50: Trocknungsmitteln in Vliesbeutelverpackung [55] .....	71
Abbildung 51: Aufbau Rohrbegleitheizung, Rot: Heizelemente, Blau: Isolation .....	72
Abbildung 52: Prinzipskizze für die industrielle Gastrocknung [30] .....	72
Abbildung 53: Zustand Wurzelschutzkammer [24] vor (oben) und während (unten) des Schweißprozesses bei ungenügender Vorwärmung und Spüldauer; Oben: Wasser oder Eisschichten an der Oberfläche; Unten: Feuchtekonzentration im Wurzelschutzgas durch die verdampfte Wasser- oder Eisschicht der unteren Halbschale.....	73
Abbildung 54: Vorschubgeschwindigkeiten im Zusammenhang zur verwendeten Stromstärke bei den Gasgemischen Ar, Ar/He und Ar/He/H <sub>2</sub> .....	74

Abbildung 55: Auszug dem Schweißprotokoll der Schweißung eines 3/4" CrNi-Stahlrohres mit dem Gasgemisch Ar/He/H <sub>2</sub> ; I <sub>H</sub> →65 A; I <sub>G</sub> →25 A; U <sub>G</sub> →18,5 V; U <sub>H</sub> →16,5 V; I <sub>P</sub> →0,1 s; v→42 cm/s .....	75
Abbildung 56: Auszug dem Schweißprotokoll der Schweißung eines 3/4" CrNi-Stahlrohres mit dem Standardprozessgas Ar; I <sub>H</sub> →65 A; I <sub>G</sub> →25 A; U <sub>G</sub> →8,5 V; U <sub>H</sub> →8,5 V; I <sub>P</sub> →0,1 s; v→12 cm/s .....	76
Abbildung 57: Schweißnaht, Querschliff, Ar bei 12 cm/min und 65 A Hochstrom; 1,4 mm Lichtbogenlänge; bei einer Spannung von 8,5 V (Hochstromphase).....	78
Abbildung 58: Schweißnaht, Querschliff, Ar/He Gemisch bei 18,5 cm/min und 65 A Hochstrom; 1,4 mm Lichtbogenlänge; bei einer Spannung von 12,5 V (Hochstromphase).....	78
Abbildung 59: Schweißnaht, Querschliff Ar/He/H <sub>2</sub> Gemisch bei 42 cm/min und 65 A Hochstrom; 1,4 mm Lichtbogenlänge; bei einer Spannung von 16,5 V (Hochstromphase).....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: International gebräuchliche Prozessgase für das WIG-Schweißen [1] .....	19
Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften schweißtechnisch relevanter Gase [19].....	20
Tabelle 3: Wirkung der Gase Helium, Wasserstoff und Stickstoff als Komponenten eines Mischgases [20].....	21
Tabelle 4: Schutzgastypen, Anwendungsgebiete und Eigenschaften [21][24] .....	22
Tabelle 5: ARC M307 Technische Daten .....	36
Tabelle 6: Klimaprüfschrank WK 11 - 600/40 Technische Daten .....	38
Tabelle 7: Thermologger 309 technische Daten.....	39
Tabelle 8: PM880 technische Daten.....	41
Tabelle 9: Verwendet Gase und Gasgemische [21] .....	43
Tabelle 10: Anhaltswerte für die Einstellung der Grundstromstärke beim Orbitalschweißen mit gepulstem Gleichstrom [4] .....	44
Tabelle 11: Übersicht der Hauptparameter des verwendeten Schweißprogramms .	44
Tabelle 12: Ergebnisse einer EDX-Punktanalyse eines X2CrNiMo17-12-2 .....	45
Tabelle 13: Verwendete Gasgemische und deren Korrekturfaktor für Argon-Flowmeter.....	55
Tabelle 14: Errechnete Streckenenergie der einzelnen Prozessgase für verschieden Vorschubgeschwindigkeiten .....	77

## 10 Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Werkstoffzeugnis 1.4404.....	93
Anlage 2: Kontinuierliches Spektrum eines Glühstrahlers links, Linienspektrum Leuchtstoffröhre (Niederdruck Gasentladungsstrahler mit fluoreszierender Beschichtung) [33].....	94
Anlage 3: Internationale Farbbezeichnung Internationale Farbbezeichnung auf Leuchtmitteln: Die erste Stelle nach der Leistungsangabe in Watt muss dazu mit 10 und die Letzten beiden Ziffern mit 100 multipliziert werden. [41].....	94
Anlage 4: Wärmeleitfähigkeit von Prozessgaskomponenten in Abhängigkeit der Temperatur.....	95
Anlage 5: Oben: Schematischer Aufbau einer zentralen Gasversorgung für die Halbleiterindustrie; Unten: die rot dargestellten Bereiche markierten die Tankfarm und das Versorgungsnetz im Außenbereich; Fertigungskomplex GlobalFoundries (ehemals AMD) [32] [42].....	96
Anlage 6: Übersicht der vorgegebenen und einstellbaren Schweißparameter beim WIG-Orbitlaschweißen .....	97
Anlage 7: EDX-Punktscann auf der unbehandelten Oberfläche eines CrNi-Stahlrores aus 1.4404.....	98
Anlage 8: EDX-Linienscan (grüne Linie) auf der Oberfläche eines CrNi-Stahlrohrs mit durch molekularen Sauerstoff induzierten Anlauffarben; Cr: Rot, Fe: Grau, Mn: Blau, Ni: Schwarz, O: Gelb .....	99
Anlage 9: Versuchsergebnisse zur Temperaturabhängigkeit der Schweißbarkeit...	100
Anlage 10: Versuchsreihe Anlauffarben bei 23 °C ...	102
Anlage 11: Versuchsreihe Anlauffarben bei -6°C ....	104
Anlage 12: Ergebnis EDX Punktscan 1-3 Schweißgut Ar/He/h2 bei 42 cm/min .....	105
Anlage 13: Ergebnis EDX Punktscan 4-6 Grundwerkstoff Ar/He/h2 bei 42 cm/min	106
Anlage 14: Rasterelektronenmikroskopaufnahme Probe H2_78; metallografischer Schliff auf 1 µm ohne Atzung .....	107

Anlage 1: Werkstoffzeugnis 1.4404



INSPECTION CERTIFICATE

Certificate No. C100115 - 9 / 11  
Specification ASTM A269/EN 10216-5  
Grade 1.4404 / S31603

EN 10204-3.1

Date 2010-01-15  
Customer Dockweiler  
Purchase Order No. 4500000680

DW/NO	Heat No	Lot No	Size (mm)	Quantity (Pcs)	Item		* Chemical Composition (%)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
					Spec	Min	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti	N	Nb																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
AA2318	A23302	SSE09121401	OD19.05 * 1.65T * L6000	60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															

\*Marking: DOCKWEILER AA2318 19.05\*1.65 mm 1.4404/S31603 -DIN EN 10216-5 TC1 CFA  
- ASTM A269/A270/A632 S NDE -ASME SA213 avg.wall -Heat A23302 -(KHY)-CTC- Inc.

It is hereby certified that the above results are true and correct in every details  
\* Chemical Composition is posted from Mill Maker's certificate.

Clean Tube Creation

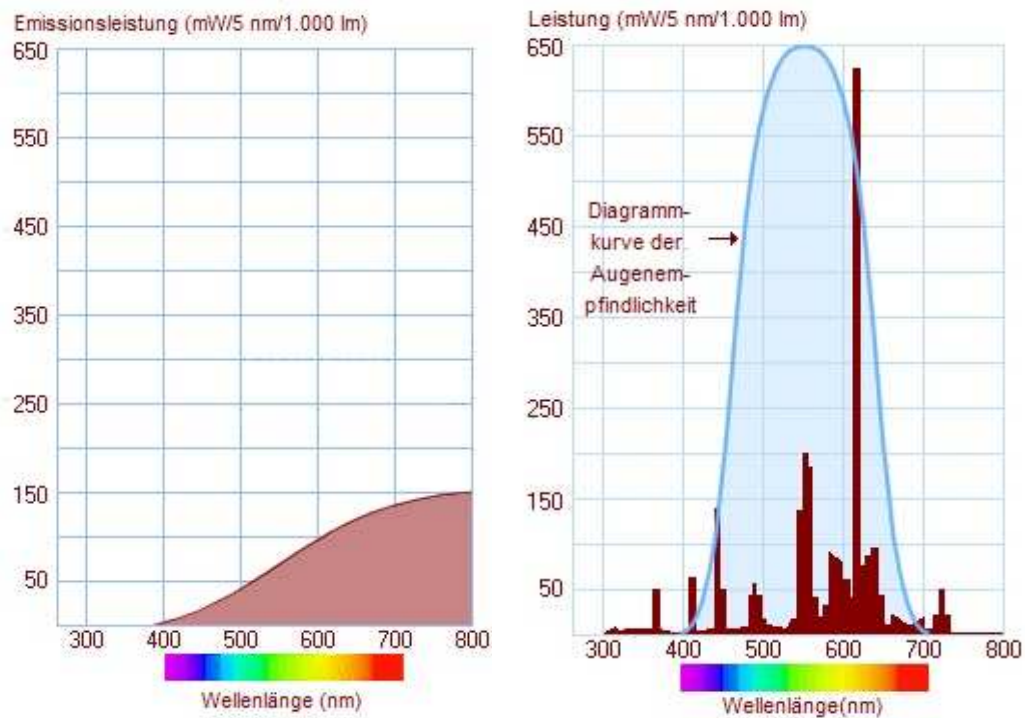
399 Eunhyeon-ri, Naechon-myeon, Pochon-city, Kyungki-do 487-832 Korea  
Tel : (82)31-534-0744 Fax : (82)31-534-0746

Manager of QC Team





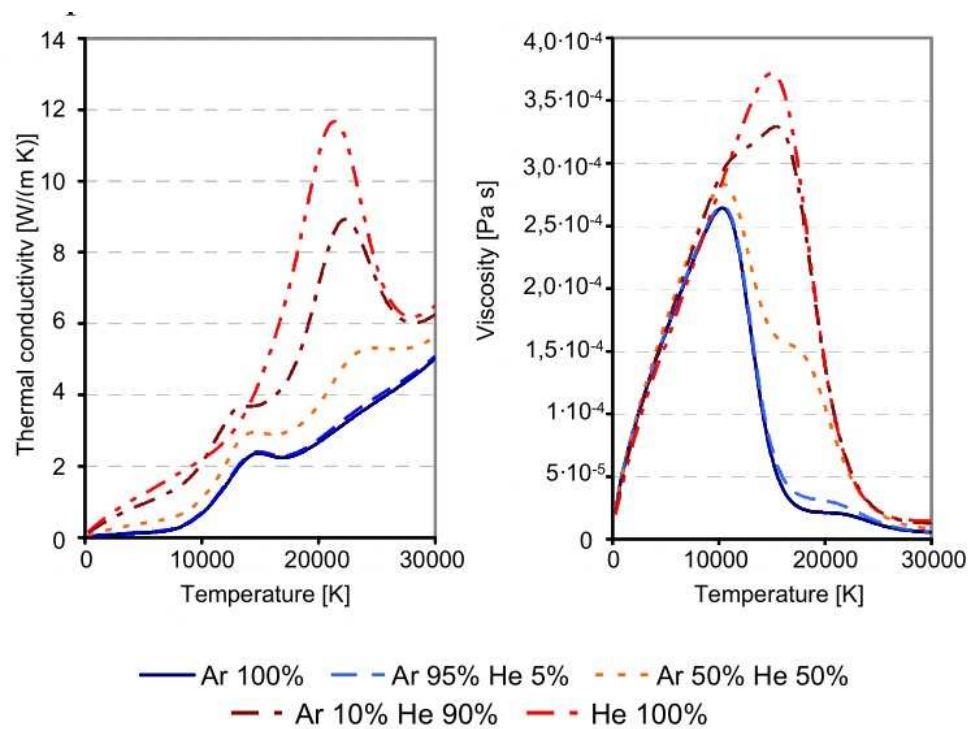
**Anlage 2:** Kontinuierliches Spektrum eines Glühstrahlers links, Linienspektrum Leuchtstoffröhre (Niederdruck Gasentladungsstrahler mit fluoreszierender Beschichtung) [33]



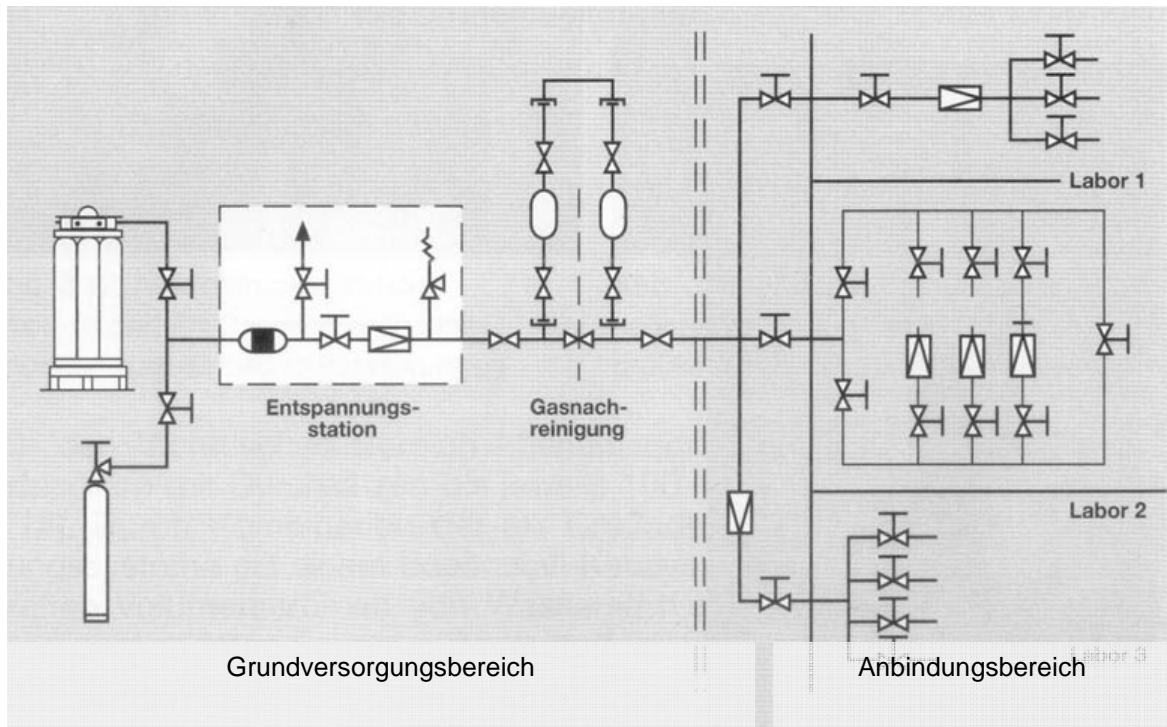
**Anlage 3:** Internationale Farbbezeichnung Internationale Farbbezeichnung auf Leuchtmitteln: Die erste Stelle nach der Leistungsangabe in Watt muss dazu mit 10 und die Letzten beiden Ziffern mit 100 multipliziert werden. [41]



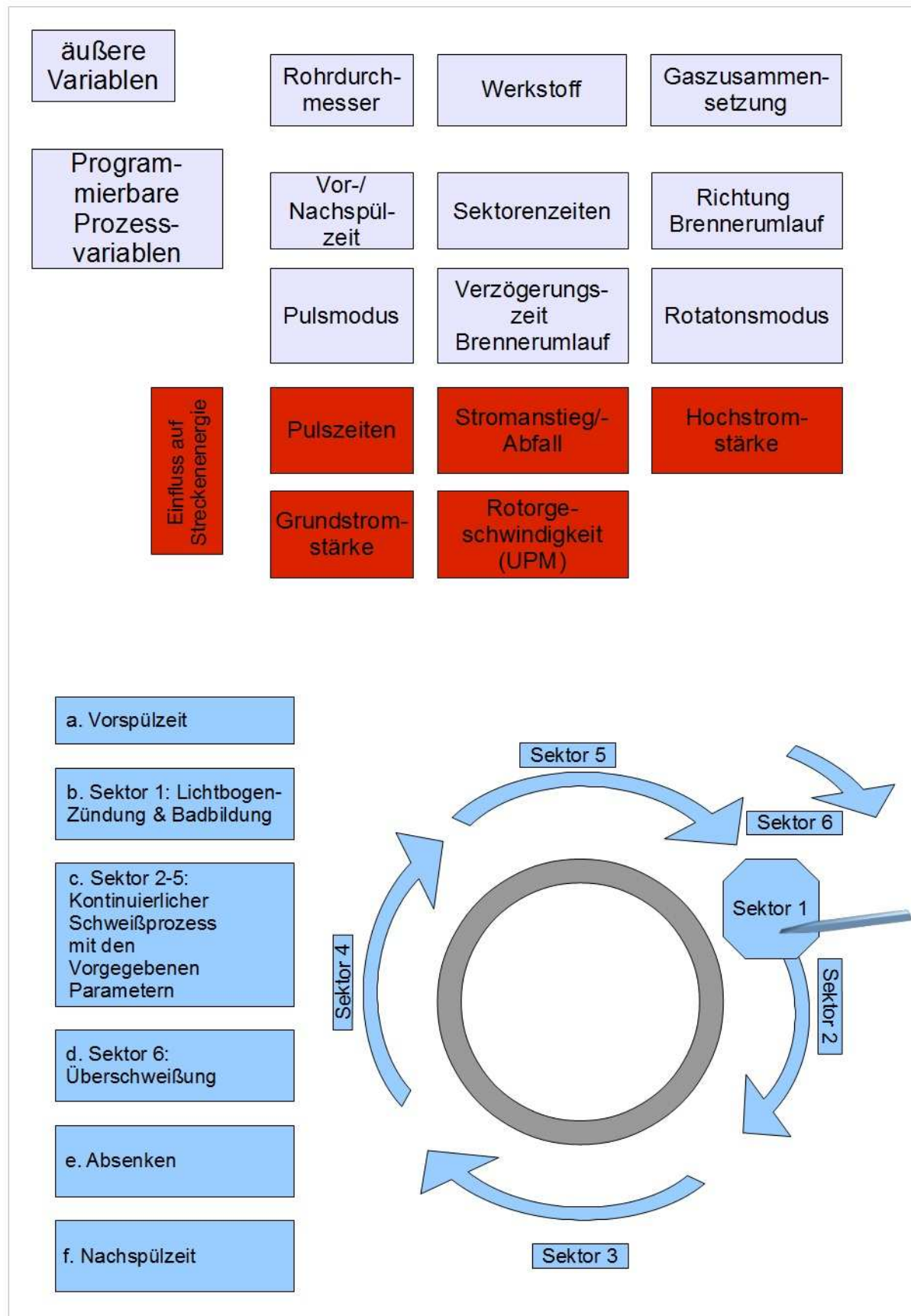
**Anlage 4:** Wärmeleitfähigkeit von Prozessgaskomponenten in Abhängigkeit der Temperatur



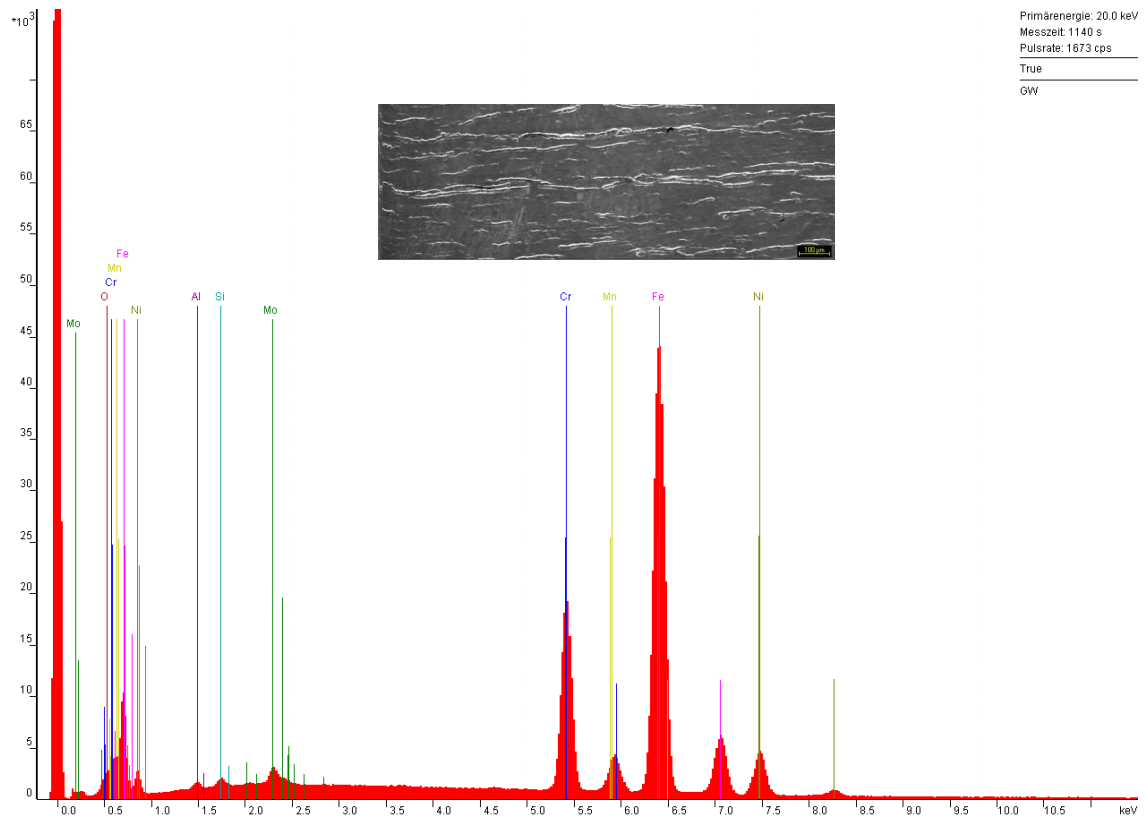
**Anlage 5:** Oben: Schematischer Aufbau einer zentralen Gasversorgung für die Halbleiterindustrie; Unten: die rot dargestellten Bereiche markierten die Tankfarm und das Versorgungsnetz im Außenbereich; Fertigungskomplex GlobalFoundries (ehemals AMD) [32] [42]



**Anlage 6:** Übersicht der vorgegebenen und einstellbaren Schweißparameter beim WIG-Orbitlaschweißen

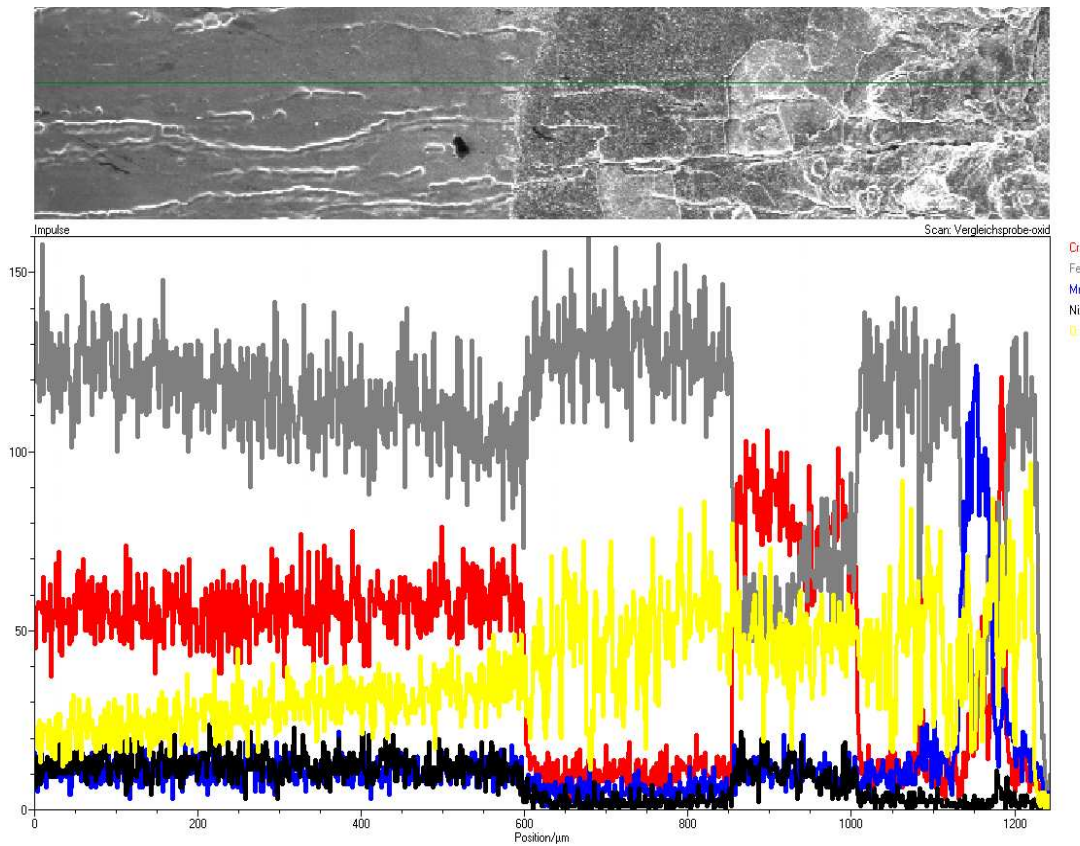


**Anlage 7:** EDX-Punktscann auf der unbehandelten Oberfläche eines CrNi-Stahlrohrs aus 1.4404



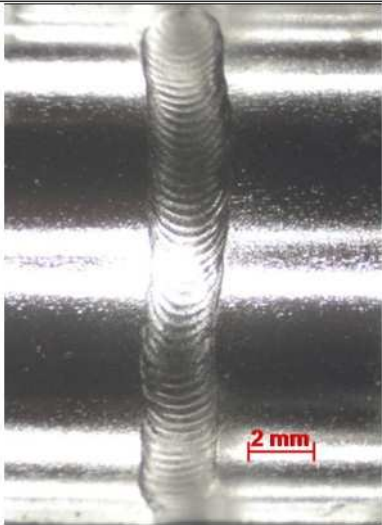
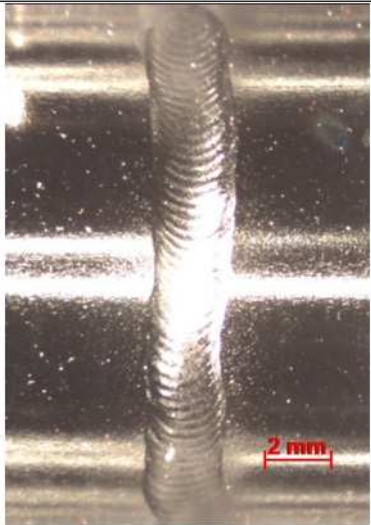
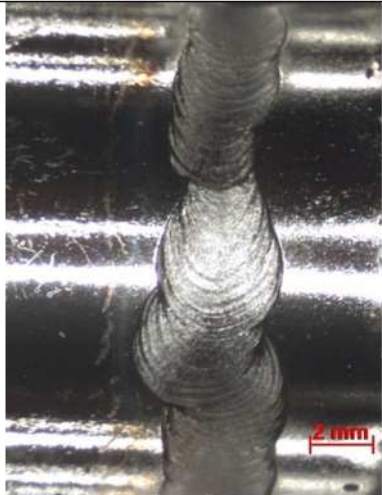
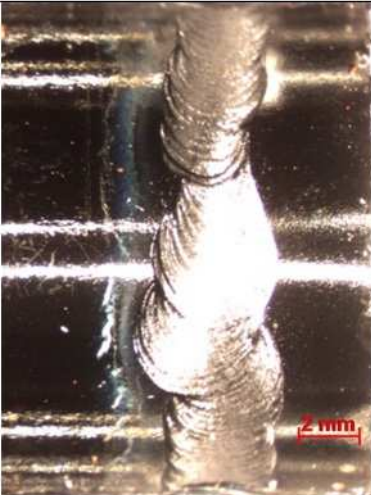
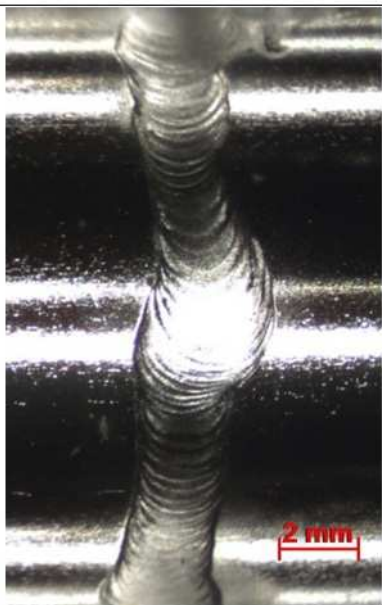
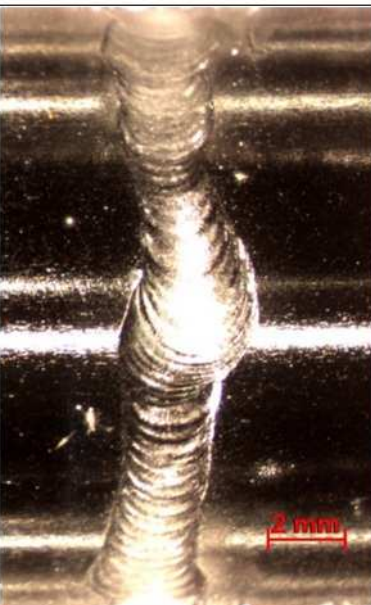




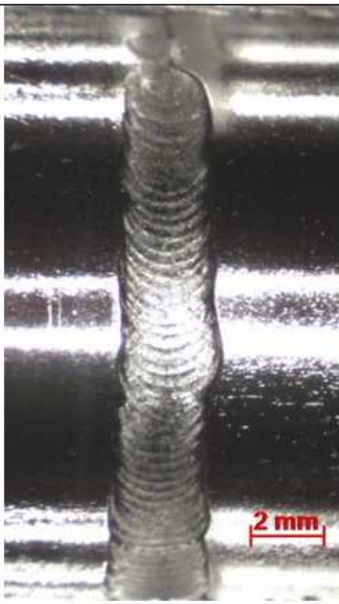
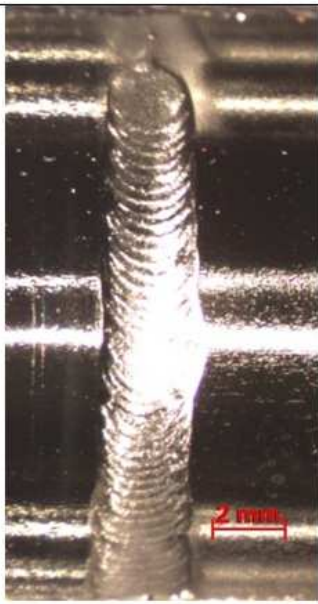
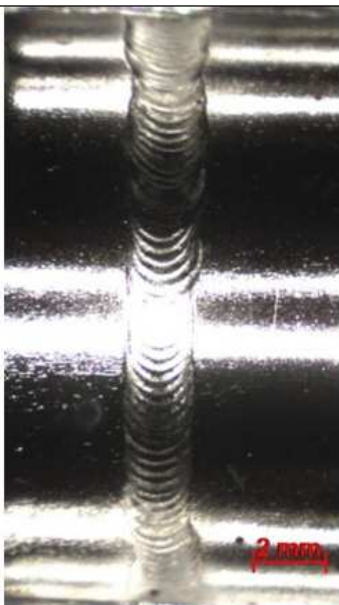
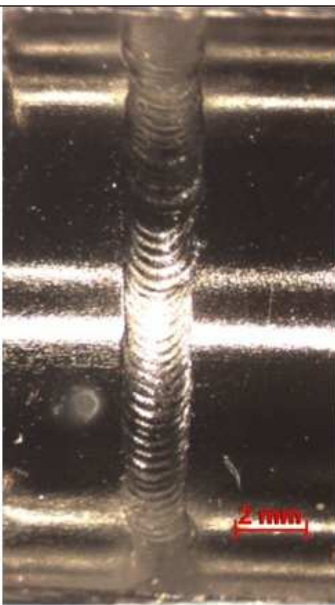
**Anlage 8:** EDX-Linienscan (grüne Linie) auf der Oberfläche eines CrNi-Stahlrohrs mit durch molekularen Sauerstoff induzierten Anlauffarben; Cr: Rot, Fe: Grau, Mn: Blau, Ni: Schwarz, O: Gelb





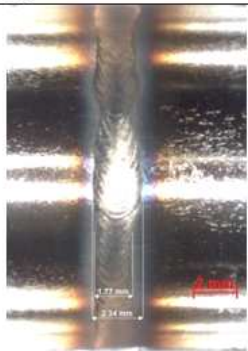









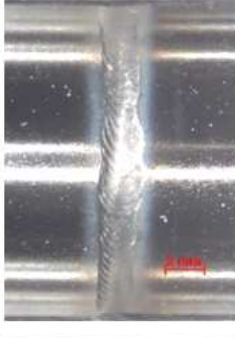

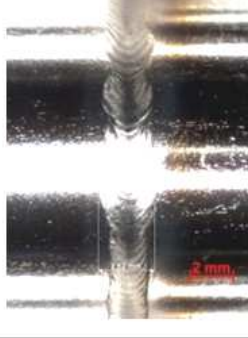


**Anlage 9: Versuchsergebnisse zur Temperaturabhängigkeit der Schweißbarkeit**










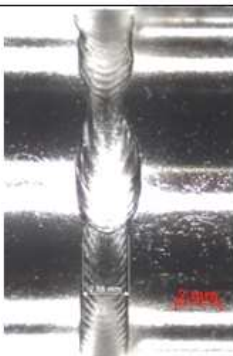


	Innen 90° Lichteinstrahlung	Innen 90°+45° Lichteinstrahlung
Ki_01		
Ki_02		
Ki_03		

Ki_04		
Ki_05		
Ki_06		



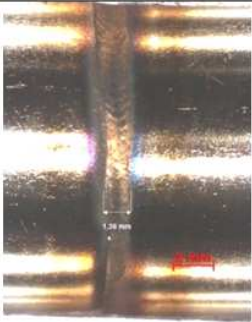
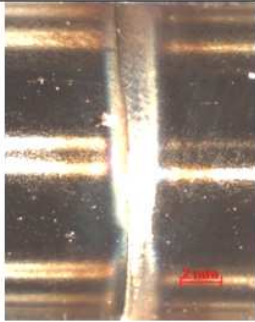
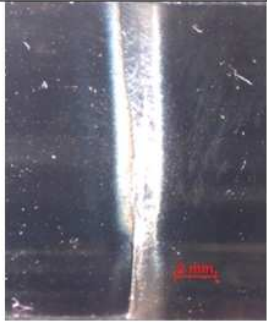
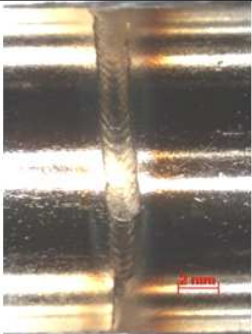
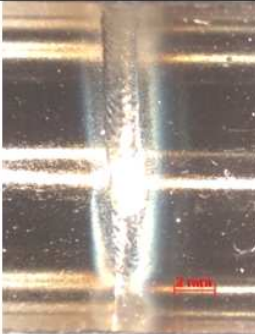

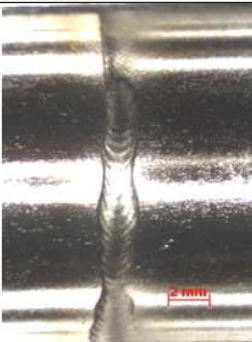
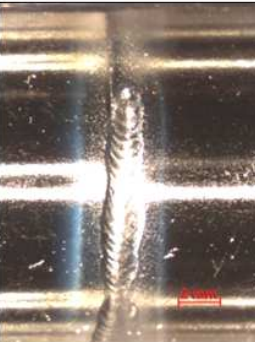




**Anlage 10:** Versuchsreihe Anlauffarben bei 23 °C

	Lichteinstrahlung 90°	Lichteinstrahlung 90°+45°	Lichteinstrahlung 45°
1200 ppm			
1000 ppm			
500 ppm			
450 ppm			
400 ppm			

	Lichteinstrahlung 90°	Lichteinstrahlung 90°+45°	Lichteinstrahlung 45°
300 ppm			
200 ppm			
150 ppm			
100 ppm			



**Anlage 11:** Versuchsreihe Anlauffarben bei -6°C

	Lichteinstrahlung 90°	Lichteinstrahlung 90°+45°	Lichteinstrahlung 45°
240 ppm			
150 ppm			
100 ppm			
50 ppm			

**Anlage 12:** Ergebnis EDX Punktscan 1-3 Schweißgut Ar/He/h2 bei 42 cm/min

Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	70,35	± 11,44	67,77
Ni	10,6	± 2,46	11,39
Al	0,1	±0,31	
Si	0,2	± 0,24	0,335
Mo	2,35	± 1,20	2,0
Cr	16,4	± 2,92	16,51
Mn	-	± 0,31	1,58

Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	69,95	± 9,70	67,77
Ni	10,81	± 2,30	11,39
Al	0,22	±0,49	
Si	0,28	± 0,34	0,335
Mo	2,11	± 0,98	2,0
Cr	16,63	± 2,36	16,51
Mn	-	± 0,31	1,58

Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	66,07	± 9,70	67,77
Ni	11,2	± 2,30	11,39
Al	0,02	±0,20	
Si	0,23	± 0,24	0,335
Mo	1,77	± 1,13	2,0
Cr	16,66	± 3,00	16,51
Mn	-	± 0,31	1,58



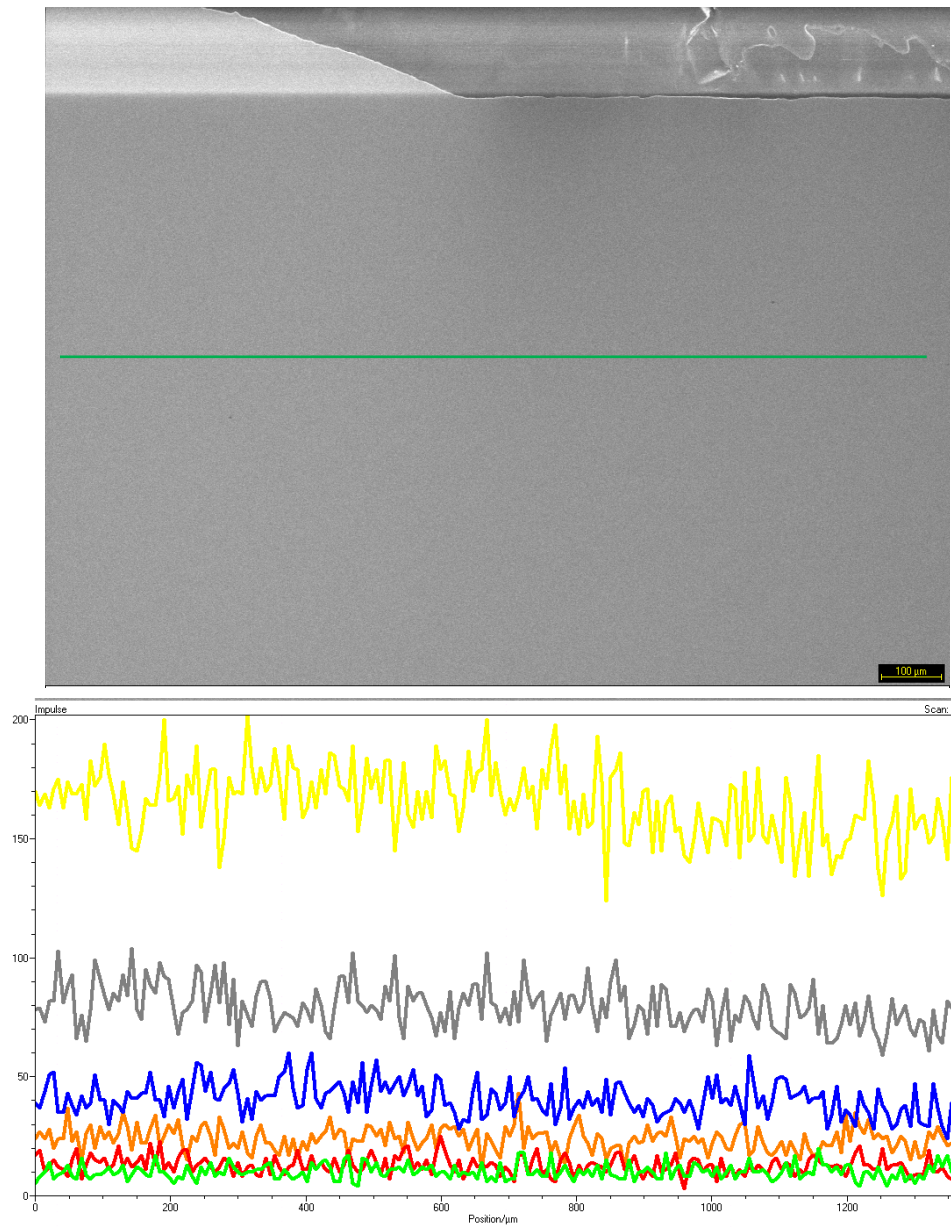
**Anlage 13:** Ergebnis EDX Punktscan 4-6 Grundwerkstoff Ar/He/h2 bei 42 cm/min

Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	63,30	± 11,54	67.77
Ni	11,02	± 2,59	11,39
Al	0,00	±0,00	
Si	0,24	± 0,25	0,335
Mo	1,94	± 1,19	2,0
Cr	16,64	± 3,01	16,51
Mn	-	± 0,31	1,58

Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	67,87	± 9,54	67.77
Ni	11,24	± 2,41	11,39
Al	0,22	±0,47	
Si	0,21	± 0,37	0,335
Mo	2,10	± 0,98	2,0
Cr	16,42	± 2,33	16,51
Mn	1,95	± 0,65	1,58

Element	Konzentration Anteile von 100 % in %	Abweichung	Konzentration nach Werkszeugnis
Fe	67,89	± 9,60	67.77
Ni	10,35	± 2,33	11,39
Al	0,30	±0,57	
Si	0,27	± 0,38	0,335
Mo	2,50	± 1,25	2,0
Cr	16,57	± 2,39	16,51
Mn	2,04	± 0,69	1,58

**Anlage 14:** Rasterelektronenmikroskopaufnahme Probe H2\_78; metallografischer Schliff auf 1  $\mu\text{m}$  ohne Ätzung



Anlage 15: Anlauffarben-Ursachen-Diagramm

